

Měření a vyhodnocení parametrů LED svítidel

Measurement and Evaluation of LED Luminaire Parameters

Šimon Vaněk

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.

Ostrava, 2021

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D., za odbornou pomoc, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

ABSTRAKT

Náplní této bakalářské práce je změřit a následně vyhodnotit parametry vybraných LED pro pěstování rostlin a následně je demonstrovat pomocí návrhu pěstební osvětlovací soustavy. V teoretické části práce jsem se zabýval rozdílem ve vnímání světla mezi rostlinou a člověkem. Dále popisuji základní zářivé, světelně-technické a fotosyntetické veličiny a metody měření těchto veličin.

V praktické části práce vytvářím metodu výpočtu fotometrických a fotosyntetických parametrů LED, cílem těchto výpočtů je zjištění konstanty pro převod světelného toku na fotosyntetický tok fotonů a následně pomocí získaných parametrů vytvořit návrh osvětlovací soustavy pro pěstební box v programu Relux.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotosyntetické aktivní záření (FAR); LED; křivka PAR; fotosyntetický tok fotonů (PPF); fotosyntetická hustota toku fotonů (PPFD); relativní spektrální citlivost; osvětlovací soustava.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to measure and then evaluate the parameters of selected LEDs for growing plants and then demonstrate them by using the design of a lighting system for growing plants. In the theoretical part of the work I dealt with the difference in the perception of light between the plant and man. I also describe the basic radiant, photometric and photosynthetic quantities and methods of measuring these quantities.

In the practical part of the work I create a method of calculating photometric and photosynthetic parameters of LEDs, the aim of these calculations is to determine the constant for the conversion of luminous flux to photosynthetic photon flux and then using the obtained parameters to create the lighting system for growing tent in Relux.

KEY WORDS

photosynthetically active radiation (PAR); LED; PAR curve; photosynthetic photon flux (PPF); photosynthetic Photon Flux Density (PPFD); relative spectral sensitivity; lighting system.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	PODSTATA SVĚTLA	12
2.1	SVĚTLO Z POHLEDU ČLOVĚKA	12
2.2	SVĚTLO A ROSTLINY	13
2.3	SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST LIDSKÉHO OKA VERSUS ROSTLIN	13
3	ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY	14
3.1	ELEKTROLUMINISCENČNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE (SVĚTELNÉ DIODY – LED)	14
4	ZÁŘIVÉ, SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ A FOTOSYNTETICKÉ JEDNOTKY	15
4.1	ZÁŘIVÉ JEDNOTKY	15
4.1.1	Zářivý tok	15
4.1.2	Zářivost	16
4.1.3	Ozářenost	16
4.1.4	Zářivá účinnost	16
4.2	SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ JEDNOTKY	17
4.2.1	Světelný tok	17
4.2.2	Svitivost	17
4.2.3	Osvětlenost	19
4.2.4	Jas	20
4.2.5	Měrný světelný výkon	21
4.3	FOTOSYNTETICKÉ JEDNOTKY	22
4.3.1	Fotosyntetická aktivní záření	22
4.3.2	Fotosyntetický fotonový tok	22
4.3.3	Fotosyntetická hustota fotonového toku	22
4.3.4	Fotosyntetická účinnost fotonu	23
4.3.5	Distribuce intenzity fotosyntetických fotonů	23
4.3.6	Denní světelný integrál	23
5	MĚŘENÍ ZÁŘIVÝCH, SVĚTELNĚ-TECHNICKÝCH A PAR PARAMETRŮ SVÍTIDLA/ZDROJŮ SVĚTLA	24
5.1	RADIOMETRIE	24
5.2	ZÁKLADY FOTOMETRIE	24
5.2.1	Fotočlánky	24
5.3	PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH VELIČIN	25
5.3.1	Luxmetr	25
5.3.2	Jasoměr	25
5.3.3	Goniofotometr	26
5.3.4	Kulový integrátor	27
5.4	MĚŘENÍ FOTOSYNTETICKÝCH VELIČIN	28
5.5	PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ FOTOSYNTETICKÝCH VELIČIN	29
5.5.1	Kvantové senzory	29
5.5.2	Spektrometry	30

6	SVÍTIDLA A SVĚTELNÉ ZDROJE LED PRO PĚSTOVÁNÍ ROSTLIN	31
6.1	PARAMETRY URČUJÍCÍ KVALITU SVÍTIDLA PRO PĚSTEBNÍ ÚČELY	31
6.2	TYPY SVÍTIDEL VYUŽÍVANÉ PRO PĚSTEBNÍ ÚČELY	33
6.2.1	<i>Konstrukční části svítidla</i>	33
6.2.2	<i>LED lineární svítidla</i>	35
6.2.3	<i>LED svítidla konstrukce Quantum Board</i>	36
6.2.4	<i>Pěstební svítidla typu COB.....</i>	36
7	VÝPOČET PARAMETRŮ VYBRANÝCH LED ČIPŮ A POROVNÁNÍ VÝPOČTU S KATALOGOVÝMI HODNOTAMI	38
7.1	KŘIVKA POPISUJÍCÍ SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST LIDSKÉHO OKA.....	38
7.2	KŘIVKY POPISUJÍCÍ SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST ROSTLIN	39
7.2.1	<i>Křivka relativní spektrální citlivosti FAR (The McCree curve)</i>	39
7.2.2	<i>Křivka PAR</i>	39
7.2.3	<i>Srovnání křivek McCree a PAR.....</i>	40
7.3	VYBRANÉ SVĚTELNÉ DIODY A JEJICH KATALOGOVÉ PARAMETRY	41
7.4	POSTUP VÝPOČTU SVĚTELNÉHO TOKU A FOTOSYNTETICKÉHO TOKU FOTONŮ V PROGRAMU EXCEL.....	44
7.4.1	<i>Výpočet světelného toku</i>	44
7.4.2	<i>Výpočet fotosyntetického toku fotonů (PPF).....</i>	45
7.5	VYHODNOCENÍ VÝPOČTU A POROVNÁNÍ VÝSLEDKU S KATALOGOVÝMI HODNOTAMI	46
8	NÁVRH VÝPOČTU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY PRO PĚSTEBNÍ ÚČELY	49
8.1	VÝSLEDKY VÝPOČTU INTENZITY OSVĚTLENÍ A PPFD	50
8.2	PŘÍKLADY VÝPOČTU S POUŽITÍM PŘEVODNÍ KONSTANTY	51
9	ZÁVĚR	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam použitých zkratek:

Zkratka	Význam zkratky	Jednotka
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování	
COB	Chip-on-Board (Čip na desce – označuje specifický typ LED čipu)	
DIN	Německá národní norma	
FAR	Fotosyntetické aktivní záření ve spektru 400 až 700 nm	
FV článek	Fotovoltaický článek	
GFM	Goniofotometr	
LED	Light-Emitting Diode (Elektroluminiscenční dioda, neboli světelná dioda)	
MCPCB	Metal-core printed circuit board (Deska plošných spojů s kovovým jádrem)	
PAR	Photosynthetically Active Radiation (fotosyntetické aktivní záření)	
PLCC	Plastic Leaded Chip Carrier (Plastovo-olověný nosič čipu)	
SI	Mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin	
UV-A	Ultrafialové záření v oblasti s vlnovou délkou 320 až 400 nm	
UV-B	Ultrafialové záření v oblasti s vlnovou délkou 280 až 320 nm	
V(λ)	Křivka fotopického vidění v oblasti 380 až 780 nm	

Seznam použitých symbolů:

Symbol	Význam symbolu	Jednotka
A	Plocha	m^2
E	Osvětlenost / Intenzita osvětlení	lx
DLI	Daily light integral (Integrál denního světla)	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
E_e	Ozářenost / Intenzita ozáření	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
E_n	Normálová intenzita osvětlení	lx
f(γ)	Funkce charakterizující tvar křivky jasu	
I	Svítivost	cd
I_e	Zářivost	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$
K_m	Měrná světelná účinnost lidského oka	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
L	Jas	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$
PPE	Photosynthetic Photon Efficacy (Fotosyntetická účinnost fotonů)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$
PPF	Photosynthetic Photon Flux (Fotosyntetický tok fotonů)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density (Fotosyntetická hustota toku fotonů)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
PPID	Photosynthetic Photon Intensity Distribution (Distribuce intenzity fotosyntetických fotonů)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$
P	Příkon	W
r	Poloměr	m
t	Čas	s
W	Vyzářená energie	J
α	Úhel	°
η_p	Měrný světelný výkon	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
η_e	Zářivá účinnost	%
λ	Vlnová délka	nm
φ	Světelný tok	lm
Φ_e	Zářivý tok	W
Ω	Prostorový úhel	sr

Seznam obrázků:

Obr. 1 Barevné spektrum viditelného světla [2]	12
Obr. 2 Rostlinná a lidská citlivost na světlo [7].....	13
Obr. 3 Vymezení prostorového úhlu [2].....	18
Obr. 4 Osvětlenost [2]	19
Obr. 5 Definice osvětlenosti bodového zdroje [2].....	20
Obr. 6 Definice jasu [2].....	21
Obr. 7 Luxmetr [16]	25
Obr. 8 Jasoměr Minolta [17].....	26
Obr. 9 Goniofotometr – typ pevný zdroj a otočný senzor [18]	27
Obr. 10 Kulový integrátor, geometrie měření 4π [19]	28
Obr. 11 Kvantový snímač/senzor [21]	29
Obr. 12 Spektrometr [22]	30
Obr. 13 Mapa světelné stopy / Graf PPFD [13]	33
Obr. 14 Lineární pěstební svítidlo, jednořadé [32].....	35
Obr. 15 Lineární víceřadé pěstební svítidlo Lumatek Zeus [33]	35
Obr. 16 Svítidlo koncepce Quantum Board [35]	36
Obr. 17 Svítidlo typ COB [37].....	37
Obr. 18 Křivka fotopického vidění $V(\lambda)$	38
Obr. 19 Křivka relativní spektrální citlivosti McCree [38].....	39
Obr. 20 Křivka PAR [38]	40
Obr. 21 Porovnání křivek PAR a McCree [38].....	40
Obr. 22 Spektrum LED 3000K [39].....	41
Obr. 23 Spektrum LED HYPER RED [40]	42
Obr. 24 Spektrum LED DEEP BLUE [41]	43
Obr. 25 Rozdíl v maximech a minimech spektrálních křivek citlivosti v závislosti na vyzařovaném spektru počítané LED.....	48
Obr. 26 Návrh osvětlení pěstební boxu.....	49

Seznam tabulek:

Tab. 1 Analogie mezi světelně-technickými, zářivými jednotkami a fotosyntetickými veličinami [9] ..	15
Tab. 2 Kategorie fotosyntetické účinností fotonů svítidel [25]	32
Tab. 3 Doporučené hladiny PPFD pro různé fáze růstu [27]	32
Tab. 4 Katalogové hodnoty bílé světelné diody 3000K [39]	41
Tab. 5 Katalogové hodnoty světelné diody HYPER RED RED [40]	42
Tab. 6 Katalogové hodnoty světelné diody DEEP BLUE [41]	43
Tab. 7 Tabulka výsledků: Světelný tok.....	44
Tab. 8 Tabulka výsledků: fotosyntetický tok fotonů	45
Tab. 9 Srovnávací tabulka výsledných parametrů LED vztažených k 1 W příkonu.....	46
Tab. 10 Srovnání vypočtených hodnot a hodnot výrobce.....	47
Tab. 11 Vypočtené parametry svítidel (osazených třemi typy LED).....	50

1 ÚVOD

V úvodu mé bakalářské práce v její teoretické části bych Vás chtěl seznámit s podstatou světla a jeho působení na lidskou populaci a široké spektrum rostlin. Dále bych Vám chtěl přiblížit základy světelné techniky a jakým způsobem dochází v současných elektrických světelných zdrojích ke vzniku světla.

Abychom mohli dobře pochopit problematiku světelných zdrojů měli bychom se nejdříve seznámit s jejich základními fyzikálními jednotkami a zejména se vztahy mezi nimi.

V další kapitole, která se věnuje měření zářivých, světelně technických a fotosyntetických parametrů svítidla a zdrojů světla jsem se snažil představit nejběžnější přístroje pro měření fotometrických a fotosyntetických veličin.

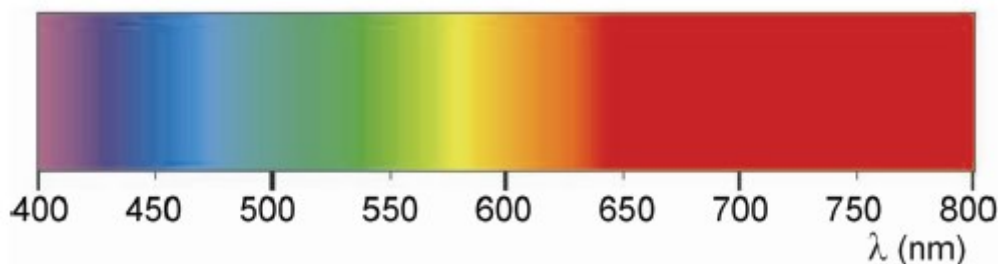
V kapitole „svítidla a světelné zdroje LED pro pěstování rostlin“ se snažím popsat a rozdělit svítidla a světelné zdroje LED na základě jejich konstrukce, kvality výstupních parametrů svítidla pro pěstební účely, použití daného svítidla v příslušné aplikaci a účinnosti přeměny elektrické energie na energii světelnou v oblasti FAR.

Praktická část bakalářské práce je zaměřená na výpočty fotometrických a fotosyntetických parametrů světelných diod. Výpočet probíhal na základě spektrální citlivosti rostlin a člověka, které popisují takzvané křivky relativní spektrální citlivosti. Cílem těchto výpočtů bylo využití rovnic pro kalkulaci světelného toku a fotosyntetického toku fotonů a ověření výsledných hodnot s hodnotami udávanými výrobcem. Pro výpočet jsem zvolil světelné diody výrobce OSRAM řady OSCONIQ.

V poslední kapitole bakalářské práce jsem se zabýval možnou implementací vypočtených parametrů LED pro případ osvětlování pěstebního boxu. Vytvořil jsem tři teoretická svítidla osazené třemi typy vybraných LED a vložil je do programu Relux, ve kterém jsem provedl tři samostatné výpočty přímé osvětlenosti. Výsledné hodnoty přímé osvětlenosti jsem přepočítal pomocí převodní konstanty na fotosyntetickou hustotu fotonového toku. Výstupní hodnoty byly porovnány v oblasti fotosyntetické a elektrické účinnosti.

2 PODSTATA SVĚTLA

Většina z nás při představě o světle nejčastěji uvažuje o prostředku, díky kterému jsme schopni vidět a rozeznávat barvy, předměty, osoby a další. V tomto případě tedy mluvíme o světle jakožto viditelné části elektromagnetického záření. Rozsah vnímání této viditelné části světla je velmi individuální. Rozdíly ve vnímání jsou zásadní na poli živočišných druhů, ale také na citlivosti zrakového orgánu každého jedince stejného druhu. [1]



Obr. 1 Barevné spektrum viditelného světla [2]

Otázkami pojednávajícími okolo světla se lidé zabývají již od starověku, avšak samotnou podstatu světla vědci začínají zkoumat až mnohem později. V 17. století byly zavedeny dvě rozdílné teorie o povaze světla. [1]

První z nich předložil v roce 1678 v pařížské Akademii Chritiaan Huygens (1629-1695), která uvažuje o světle jako o podélném vlnění. Naopak Issac Newton (1643-1727) v roce 1704 vydal knihu s názvem Opticks, ve které uvažuje o světle jako o toku částic. Jak již známe z historie, většina slavných teorií nebyla ve své době uznána, a proto až v 19. století, tedy o dvě stě let později, nastal obrovský rozmach vlnové teorie pana Huygense. [1] [3]

Dnes již víme, že světlo má dvojí povahu. Je příčnou elektromagnetickou vlnou ve velmi úzké oblasti vlnových délek, a zároveň se také projevuje jako tok fotonů (foton = částice světla). Obě výše zmíněné teorie byly potvrzeny. Avšak za ověřením těchto teorií stojí obrovská práce a náročný vývoj v oblasti výzkumu světla a přístrojů vytvořených pro samotné měření světla. [1]

2.1 Světlo z pohledu člověka

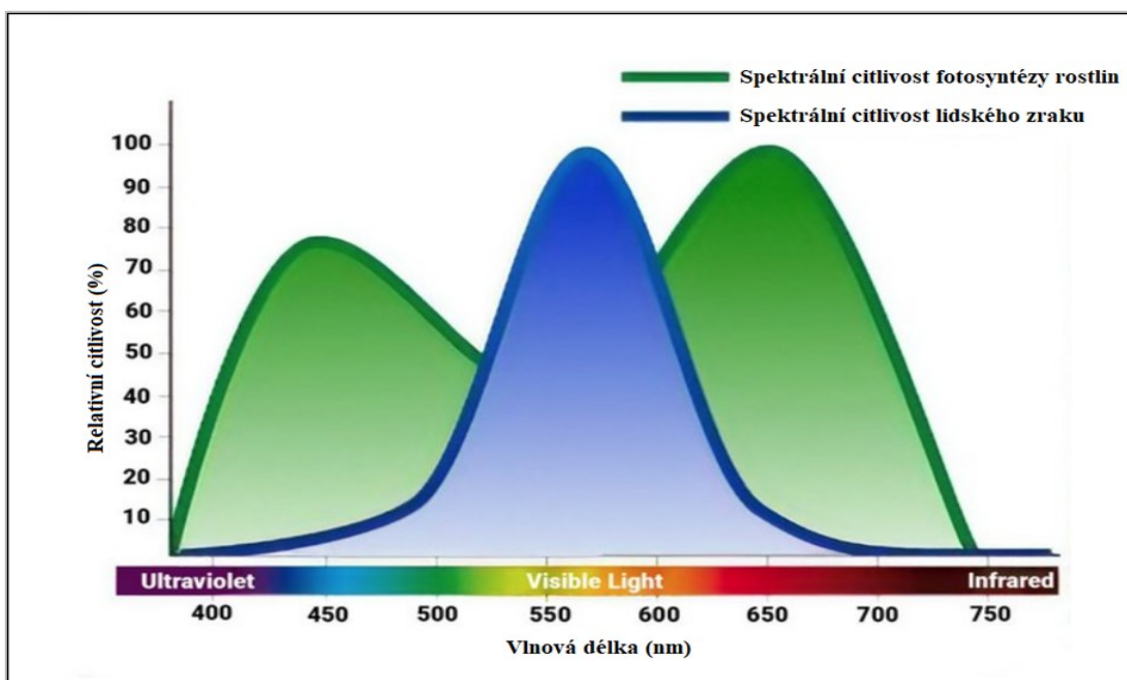
Prostřednictvím zrakového orgánu a na něj dopadajícího světla neboli elektromagnetického záření ve viditelné oblasti (380 – 780nm) se vybudí zrakový vjem. Tento zrakový vjem lidem umožňuje vykonávat méně či více složité úkony a bezproblémově se pohybovat v prostoru. Člověk vnímá 70 % informací ze svého prostředí (okolního světa) díky schopnosti vidět. Světlo ovlivňuje mnoho fyziologických procesů v lidském těle, například stimuluje tvorbu serotoninu (hormonu „štěstí“) nebo melatoninu, který řídí spánek a bdělost. Světlo tedy můžeme považovat za prostředek pro celkové zdraví a pohodu člověka. [2] [4]

2.2 Světlo a rostliny

Rostliny vnímají elektromagnetické záření ve stejném rozsahu vlnových délek jako člověk, avšak smysl využití tohoto záření se liší, jak ve způsobu vnímání, tak následnému užití. Rostliny jsou schopny absorbovat světlo pomocí všech svých zelených částí těla tedy listů a stonků. A následně tuto energii využít ve fotochemické přeměně látek zvané fotosyntéza, při které dochází k přeměně CO_2 a vody H_2O na sacharidy a další látky potřebné pro tvorbu rostlinných tkání a rostlin jako takových. Bez světla by neexistovaly rostliny a bez rostlin by neexistoval život jaký známe. [5] [6]

2.3 Spektrální citlivost lidského oka versus rostlin

Jak již bylo zmíněno v odstavci 2.1 a 2.2 rostliny a zrakový orgán člověka vnímají světlo ve stejném rozsahu vlnových délek viditelného elektromagnetického záření, nicméně jejich citlivost na danou spektrální část viditelného záření je odlišná. Lidský zrak má největší citlivost v oblasti 555 nm (zelená barva spektra), na druhou stranu rostliny mají největší spektrální citlivost ve vlnových délkách 620 – 750nm (červená barva) a 450 – 475nm (modrá barva). Tuto diferenci popisuje graf relativní spektrální citlivost v závislosti na vlnové délce. [5]



Obr. 2 Rostlinná a lidská citlivost na světlo [7]

3 ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY

Světlo je tedy elektromagnetické záření, které je díky zrakového orgánu schopno vybudit zrakový vjem. Ke vzniku světla v současných elektrických světelných zdrojích dochází pomocí těchto čtyř základních principů:

- inkandescencí neboli tepelným buzením vznikajícím při zahřátí pevné látky na vysokou teplotu,
- vybuzením atomu v elektrickém výboji,
- luminiscencí pevných látek, (fotoluminiscence)
- emisí fotonu při průchodu proudu polovodičem.

S inkandescencí se setkáváme u běžných halogenových žárovek, kde dodávanou energií je energie tepelná, a ta vzniká při průchodu elektrického proudu wolframovým vláknem. [2]

Vybuzením atomů v elektrickém výboji vzniká světlo při nepružných srážkách atomů, iontů a elektronů ve sloupci výboje, který se nachází v elektrickém poli. Tento princip se využívá u všech typů nízkotlakých a vysokotlakých výbojových zdrojů (zářivky, rtuťové, sodíkové a halogenidové a nové typy výbojek). [2]

Další typ vzniku světla je založen na principu přeměny záření o kratší vlnové délce, například ultrafialového na viditelné záření o delší vlnové délce. Tento jev se nazývá fotoluminiscence a nastává v chemických látkách. Těmto látkám se říká luminofory, tyto látky jsou nanášeny na vnitřních stranách výbojových trubíc či baněk. Pomocí těchto látek je možné ultrafialové záření přetransformovat do viditelné oblasti. [2]

Poslední princip vzniku světla je pomocí emisí fotonu při průchodu proudu polovodičem. V tomto případě mluvíme o LED diodách (světelné diody), o tomto principu vzniku světla se budeme zabývat v této Bakalářské práci. [2]

3.1 Elektroluminiscenční světelné zdroje (Světelné diody – LED)

Světelné diody představují elektronickou součástku, která je schopná generovat světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem (P-N přechod). P-N přechod má velmi úzké spektrum vyzařování, primární záření je v podstatě monochromatické. Jedna z možností, jak dosáhnout bílé barvy je pomocí použití modrého čipu, který má vrstvu aktivní hmoty. Tato vrstva je schopná převést modré záření na jiné vlnové délky viditelného spektra. [2]

Světelné diody jsou v dnešní době vysoce účinnými světelnými zdroji, které postupně vytlačují z většiny aplikací zdroje konvenční jako například (žárovky, zářivky, nízkotlaké a vysokotlaké výbojky). [2] [8]

Ve srovnání se životností žárovky (1000 hodin) a zářivky (8000 hodin) mají LED velmi výrazně delší životnost (až 100 000 hodin). Kromě své dlouhé životnosti mají LED diody oproti konvenčním zdrojům světla mnoho výhod. Mezi tyto výhody patří malá velikost, specifická vlnová délka, vysoká měrná světelná účinnost až $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, poměrně plynule nastavitelný světelný tok (pomocí proudové regulace) a také vysoká účinnost fotoelektrické přeměny (nesrovnatelně menší podíl tepelných ztrát). Díky těmto výhodám jsou světelné diody ideální zdroje světla také pro pěstování rostlin. [8]

4 ZÁŘIVÉ, SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ A FOTOSYNTETICKÉ JEDNOTKY

V této kapitole si definujeme základní zářivé, světelně-technické a fotosyntetické jednotky a další veličiny potřebné k výpočtům těchto jednotek.

Tab. 1 Analogie mezi světelně-technickými, zářivými jednotkami a fotosyntetickými veličinami [9]

Zářivé jednotky		Světelně-technické jednotky		Fotosyntetické jednotky v oblasti PAR	
Veličina	Jednotka	Veličina	Jednotka	Veličina	Jednotka
Zářivý tok	watt (W)	Světelný tok	lumen (lm)	Fotosyntetický tok fotonů (PPF)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Zářivost	$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$	Svítivost	kandela (cd)	Distribuce intenzity fotosyntetických fotonů (PPID)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$
Ozářenost	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Osvětlenost	lux (lx)	Fotosyntetická hustota toku fotonů (PPFD)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
Zářivá účinnost	%	Měrná světelná účinnost	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$	Fotosyntetická účinnost fotonů (PPE)	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$

4.1 Zářivé jednotky

Měřením a definováním zářivých jednotek se zabývá určitá oblast optiky, nazývá se radiometrie. Ta se zabývá měřením elektromagnetického záření včetně spektrální oblasti viditelného záření. Radiometrie pohlíží na záření jako na formu energie, a proto využívá absolutní jednotky. Radiometrické neboli zářivé jednotky. [10] [11]

4.1.1 Zářivý tok

Zkratka/Symbol: Φ_e

Jednotka: W

Je to energie vyzářená bodovým zdrojem záření do určitého prostorového úhlu za čas.

$$\Phi_e = \frac{W}{t}$$

Φ_e – zářivý tok (W), W – energie vyzářená zdrojem (J), t – doba trvání záření (s). [10] [11]

4.1.2 Zářivost

Zkratka/Symbol: I_e

Jednotka: $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$

Zářivost udává zářivý tok vyzářený do jednotkového prostorového uhlu, do kterého je tento tok vyzařován. Vztah pro zářivost bodové zdroje:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$$

I_e – zářivost bodové zdroje ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$), Φ_e – zářivý tok (W), Ω – prostorový úhel (sr). [10] [11]

4.1.3 Ozáření

Zkratka/Symbol: E_e

Jednotka: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

Ozáření neboli intenzita ozáření vyjadřuje energii, která dopadne na jednotku povrchu ozařovaného tělesa za jednotku času. Pokud označíme plochu ozařovaného tělesa A a zářivý tok dopadající na tuto plochu Φ_e , pak platí vztah:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A}$$

E_e – ozáření ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), A – plocha ozařovaného tělesa (m^2), Φ_e – zářivý tok (W).

Jestliže budeme uvažovat o zdroji bodového světla, pak ozáření klesá se čtvercem vzdálenosti ozařované plochy. Úhel alfa definujeme sklon ozařované plochy ke zdroji světla (odklon od normály), díky tomu můžeme používat upravený vztah:

$$E_e = \frac{I_e \cdot \cos \alpha}{l^2}$$

E_e – ozáření ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), I_e – zářivost bodové zdroje ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$), l – vzdálenost ozařované plochy od zdroje, α – úhel mezi ozařovanou plochou a zdrojem světla. [11]

4.1.4 Zářivá účinnost

Zkratka/Symbol: η_e

Jednotka: %

Zářivá účinnost neboli účinnost přeměny energie, se kterou systém převádí energii elektrickou na energii světelnou. Z této veličiny jsme schopni určit také tepelné ztráty daného zdroje záření. Příklad: ze zdroje světla se zářivou účinností 70 % a 1 W dodaného příkonu získáme 0,7 W zářivého toku a 0,3 W energie v podobě tepla. [9]

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P}$$

η_e – zářivá účinnost (%), Φ_e – zářivý tok (W), P – elektrický příkon (W)

4.2 Světelně-technické jednotky

V následující kapitole jsou uvedeny a vysvětleny základní světelně technické veličiny pro popsání světelného záření a jeho parametrů vztahených pro takzvaného normálního fotometrického pozorovatele. Tento pozorovatel je definován průměrnými vlastnostmi lidského zrakového orgánu. Počítáme s průměrným pozorovatelem, protože každý člověk může mít rozdílnou citlivost k odlišným vlnovým délkám světla. Tyto fotometrické veličiny jsou sjednoceny pod záštitou Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Mimo to je jednotka svítivosti (cd) také v mezinárodní soustavě jednotek SI. [2]

4.2.1 Světelný tok

Zkratka/symbol: Φ

Jednotka: Lumen (lm)

Světelný tok je světelně technická veličina udávající celkové množství světelné energie, kterou je světelný zdroj schopen vyzářit za jednotku času vzhledem k citlivosti lidského oka na různé vlnové délce světla. Pohybujeme se tedy ve fotopické oblasti vidění. Údaj o hodnotě světelného toku světelného zdroje by měl být součástí každého katalogového listu, protože nám udává celkový světelný výkon zdroje světla. Světelný tok monochromatického záření se určí ze vztahu:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)$$

$\Phi(\lambda)$ – světelný tok pro danou vlnovou délku (lm), $K(\lambda)$ – světelný účinek monochromatického záření ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$), K_m – maximální hodnota veličiny $K(\lambda)$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$), $V(\lambda)$ – křivka fotopického vidění, která udává poměrnou světelnou účinnost monochromatického záření v dané vlnové délce (-).

Výpočet světelného toku z několika monochromatických záření:

$$\Phi = K_m \cdot \sum_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$$

K_m – pro fotopické vidění má hodnotu $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [2]

4.2.2 Svítivost

Zkratka/Symbol: I

Jednotka: Kandela (cd)

Svítivost patří do základní soustavy veličin SI. Veličina popisuje, kolik světelného toku vyzáří světelný zdroj nebo svítidlo do prostorového úhlu Ω v určitém směru. V roce 1979 byla tato jednotka definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ a frekvencí $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$. Střední hodnotu svítivosti určíme ze vzorce níže:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

I – svítivost (cd), Φ – světelný tok (lm), Ω – prostorový úhel, do kterého je světelný tok vyzařován (sr).

Veličina svítivosti je definována pro bodový zdroj či „bodové“ svítidlo, to znamená pro zdroj, jehož rozměry vyzařovací plochy [a] jsou zanedbatelné a dále ku vzdálenosti bodu [r], ke kterému je vztaženo měření. Tato podmínka se vyjádří poměrem těchto rozměrů:

$$\frac{r}{a} > a$$

V praxi je vyžadováno, aby byl tento poměr větší než 5, poté zdroj chápeme jako bodový. [2]

4.2.2.1 Prostorový úhel

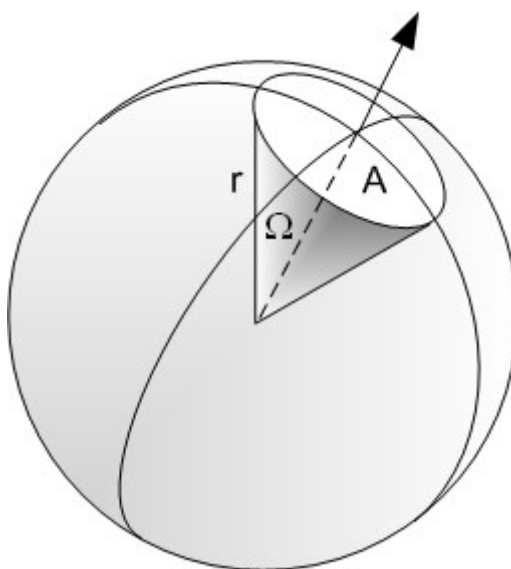
Zkratka/symbol: Ω

Jednotka: steradián (sr)

Prostorový úhel je nezbytná veličina pro výpočty ve světelné technice. Je dán částí prostoru, která je vymezena kuželovou plochou, která na kouli o poloměru r vytvoří plochu A. Tímto nám vznikne kužel, který má svůj vrchol ve středu koule. Plocha A, která jde ze středu koule vidět nám určí velikost prostorového úhlu. A vypočteme jej ze vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

Ω – prostorový úhel (sr), A – plocha vytvořena kuželem představující daný prostorový úhel (m^2), r – poloměr podstavy kužele (m). [2]



Obr. 3 Vymezení prostorového úhlu [2]

Maximální možnou hodnotou prostorové úhlu získáme, když budeme plochu A brát jako povrch celé koule, takže $A = 4\pi r^2 \rightarrow \Omega = 4\pi$

4.2.3 Osvětlenost

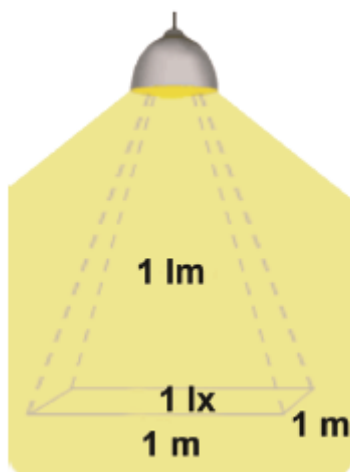
Zkratka/symbol: E

Jednotka: Lux (lx)

Osvětlenost neboli intenzita osvětlení, je definována jako hodnota světelného toku dopadajícího na jednotkovou plochu (1 m²). Hodnotu osvětlenosti určíme ze vztahu:

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

E – osvětlenost (lx), Φ – hodnota světelného toku (lm), A – plocha (m²).

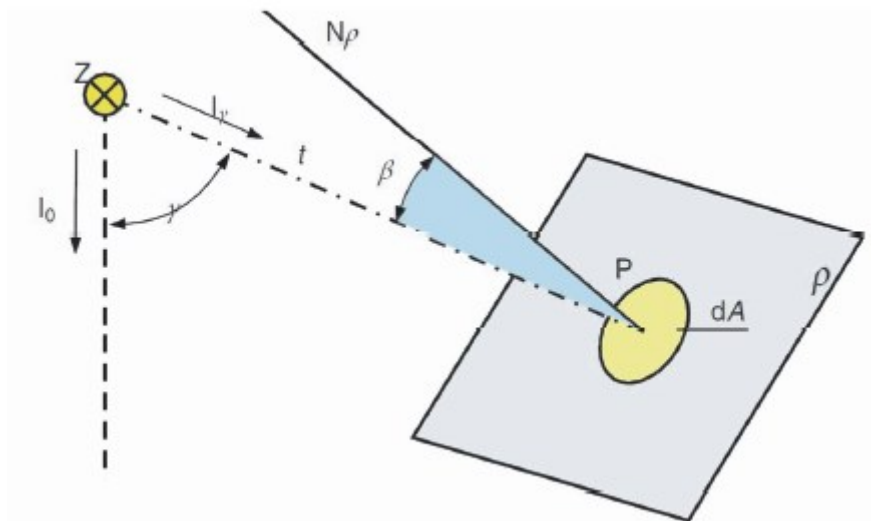


Obr. 4 Osvětlenost [2]

Osvětlenost pro bodový zdroj je možné vyjádřit pomocí svítivosti I, je k tomu zapotřebí čtvercový a kosinový zákon. Na rovinu p ze vzdálenosti l osvětlujeme bod P, bezprostřední okolí tohoto bodu tvoří plocha dA. Normála roviny N_p svírá s paprskem vyzařovaného světla úhel β a díky svítivosti I _{γ} je možné určit hodnotu osvětlenosti za pomoci vztahu:

$$E = \frac{I_{\gamma} \cdot \cos \beta}{l^2}$$

β - úhel svírající dopadající paprsek s normálou plochy, l – vzdálenost světelného zdroje od plochy (m).
[2]



Obr. 5 Definice osvětlenosti bodového zdroje [2]

4.2.3.1 Čtvercový a kosínový zákon

V rovnici pro výpočet osvětlenosti pomocí svítivosti I si lze povšimnout, že intenzita osvětlení v daném bodě P klesá, pokud roste vzdálenost světelného zdroje I od bodu P (přesněji se čtvercem vzdálenosti, proto čtvercový zákon). Mluvíme tedy o nepřímé úměře mezi osvětleností a vzdáleností mezi osvětlovanou plochou od zdroje světla. [2]

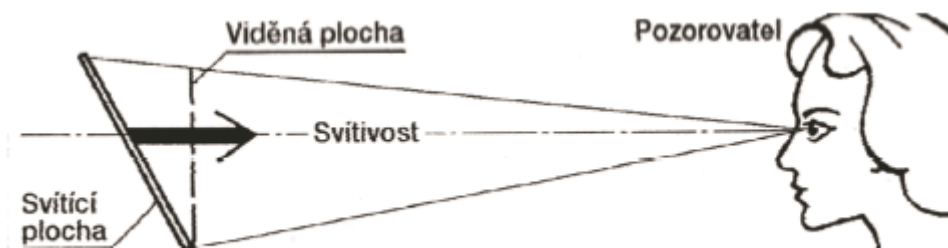
Intenzita osvětlení je také přímo úměrná hodnotě kosinu úhlu β , tato přímá úměra znamená, že se vzrůstajícím úhlem β klesá intenzita osvětlení. Maximální hodnotu intenzity osvětlení získáme, pokud bude normála roviny svírat s dopadajícím paprskem světla úhel β rovný nule. V tomto případě bude mít hodnota kosinu maximální možnou hodnotu ($\cos 0^\circ = 1$). Takovýto případ se nazývá normálová osvětlenost (normálová intenzita osvětlení) E_N . [2]

4.2.4 Jas

Zkratka/symbol: L

Jednotka: $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$

Lidský zrak reaguje na rozdíl jasů neboli kontrast přímo, je to další fotometrická veličina, definujeme jí jako měrnou svítivost, je určena plošnou prostorovou hustotou světelného toku, tento fakt má za to, že vždy záleží na poloze pozorovatele a směru jeho pohledu. Nezáleží však na tom, zdali vychází jas svazku paprsků přímo ze zdroje, nebo je odražen od libovolné plochy. [2]



Obr. 6 Definice jasu [2]

Jestliže určitému bodu v prostoru přiřadíme velikost jasu svazku paprsků a vykreslíme je v odpovídajících úhlech jako radiusvektory, vytvoříme tímto fotometrickou plochu s rozložením jasů. Díky této fotometrické ploše jsme schopni vést řezy procházející vztažným bodem. Řezy obsahující vztažné body se nazývají křivky jasu a určujeme je v polárních souřadnicích. Křivky se dají matematicky popsat vztahem:

$$L_{\gamma} = L_0 \cdot f(\gamma)$$

L_0 – jas svazku paprsků ve vztažném směru ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), L_{γ} – jas svazku paprsků ve směru pod úhlem γ měřeným od vztažného směru ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), $f(\gamma)$ – funkce charakterizující tvar křivky jasu

Jas svítidla můžeme také vyjádřit jako podíl svítivosti v daném směru (úhlu) a velikosti průmětu svítící plochy do roviny, která svírá kolmý úhel k uvažovanému směru (úhlu). Toto můžeme popsat následujícím vztahem:

$$L = \frac{I_{\gamma}}{A \cdot \cos \gamma}$$

L_{γ} – svítivost svazku paprsků svítící plochy ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$), I_{γ} – svítivost v daném směru, A – velikost svítící plochy viditelné pozorovatelem (m^2). [2]

4.2.5 Měrný světelný výkon

Zkratka/symbol: η_p

Jednotka: $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$

Měrný světelný výkon zdrojů nám popisuje úroveň přeměny elektrické energie na energii světelnou. Je dán podílem celkového světelného toku svítidla nebo světelného zdroje a elektrické příkonu P . Z tohoto podílu získáme hodnotu světelného toku, kterou jsme schopni získat z jednoho wattu příkonu. Pro tento výpočet je důležité si uvědomit, jakým způsobem je dané zařízení (žárovka, výbojka, popř. LED dioda) napájeno. Například u „klasické žárovky“, zdroj bez předřadníku, je udávaný výkon shodný s příkonem světelného zdroje. Naopak u světelných zdrojů s předřadníkem je nutno definovat měrný příkon. Ten je roven měrnému výkonu zvětšenému o výkon spotřebovaný předřadníkem. Měrný světelný výkon vypočteme za pomoci toho vztahu:

$$\eta_p = \frac{\Phi}{P}$$

η_p – měrný světelný výkon ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$), Φ – světelný tok (lm), P – elektrický příkon (W). [2]

4.3 Fotosyntetické jednotky

4.3.1 Fotosyntetická aktivní záření

Zkratka/symbol: FAR (v anglické literatuře PAR)

FAR je definováno jako elektromagnetické záření ve spektrálním rozsahu 400 až 700 nm, které mohou organismy schopné fotosyntézy vstřebat a využít pro přeměnu světelné energie na energii chemickou. [12]

4.3.2 Fotosyntetický fotonový tok

Zkratka/Symbol: PPF

Jednotka: $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

Fotosyntetický fotonový tok je veličina, která udává celkové množství FAR, které produkuje osvětlovací systém. K vyjádření PPF používáme jednotku mikromoly za sekundu ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$). Tato metrika neprokáže, kolik světla skutečně dopadne na plochy rostliny (všechny zelené části rostliny: listy, okvětní lístky, stonek apod.), ale celkový počet vyzářených světelných částic (fotonů), který daný osvětlovací systém je schopen vyzářit za sekundu. Proto je tato veličina velmi důležitá pro výpočet efektivity osvětlovací soustavy ve spektru FAR.

$$PPF = \frac{1}{119,62} \sum_{400}^{700} \Phi_e(\lambda) * PAR(\lambda)$$

PPF – fotosyntetická hustota fotonového toku ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), $\Phi_e(\lambda)$ – zářivý tok v dané vlnové délce ($\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$), $PAR(\lambda)$ – spektrální křivka relativní citlivosti rostlin (nm^{-1}). [12] [13]

4.3.3 Fotosyntetická hustota fotonového toku

Zkratka/Symbol: PPFD

Jednotka: $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Veličina PPFD neboli hustota fotosyntetického toku fotonu, udává množství fotosynteticky aktivních fotonů, které dopadají na plochu jednoho čtverečního metru za sekundu ve spektru FAR. Tento údaj je nejlepší dostupné měřítko pro srovnání pěstebních osvětlovacích systému na trhu. Dá se tedy říct, že nám udává intenzitu osvětlení ve spektru FAR, který je vhodný pro potřeby rostlin.

$$PPFD = \frac{PPF}{A}$$

PPFD – fotosyntetická hustota fotonového toku ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), PPF – fotosyntetická tok fotonů ($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), A – plocha (m^2). [13] [14]

4.3.4 Fotosyntetická účinnost fotonu

Zkratka/symbol: PPE

Jednotka: $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ nebo $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$

Veličina PPE označuje přeměnu elektrické energie na množství fotonů v oblasti FAR. Vypočteme jí ze vztahu:

$$PPE = \frac{PPF}{P}$$

PPE – fotosyntetická účinnost fotonu ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ nebo $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$). PPF – fotosyntetický tok fotonů ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$), P – elektrický příkon (W). [14] [15]

4.3.5 Distribuce intenzity fotosyntetických fotonů

Zkratka/symbol: PPID

Jednotka: $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$

Veličina PPID popisuje, kolik fotosyntetických aktivních fotonů vyzáří světelný zdroj nebo svítidlo do prostorového úhlu Ω v určitém směru.

$$PPID = \frac{PPF}{\Omega}$$

PPID – distribuce intenzity fotosyntetických fotonů ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$), PPF – fotosyntetický fotonový tok ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$), Ω – prostorový úhel (sr). [9]

4.3.6 Denní světelný integrál

Zkratka/symbol: DLI

Jednotka: $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

Denní světelný integrál (DLI) je definován jako celkové množství fotonů v oblasti FAR, které dopadají na rostlinu během celého dne. Každá konkrétní rostlina potřebuje ke správnému vývoji specifickou hodnotu DLI, Existuje dobrá korelace mezi průměrným DLI a růstem rostlin, z toho vyplývá, že růst rostliny se lineárně zvyšuje se zvyšováním DLI.

$$DLI = PPFD \cdot 3600 \cdot t_{\text{svitu}}$$

DLI – Denní světelný integrál ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), PPFD – hustota fotosyntetického toku fotonů ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), t_{svitu} – doba fotoperiody svícení za 24 hodin (h). [13] [14]

5 MĚŘENÍ ZÁŘIVÝCH, SVĚTELNĚ-TECHNICKÝCH A PAR PARAMETRŮ SVÍTIDLA/ZDROJŮ SVĚTLA

5.1 Radiometrie

Radiometrie je určité odvětví optiky zabývající se měřením elektromagnetického záření včetně záření viditelného (světla). Radiometrické veličiny popisují energetické vlastnosti vyzařování daného zdroje záření. Tyto veličiny můžeme nazvat také jako veličiny zářivé, mezi ně patří např. zářivý tok, intenzita záření.

Využití radiometrie je velice široké, pomocí radiometrických zařízení jsme schopni určit teplotu měřených objektů či plynů, definovat spektrální složení dopadajícího záření, případně změřit dávku radioaktivního záření (dozimetry). [11]

5.2 Základy fotometrie

Fotometrie je část optiky, která se zabývá působením světla na zrakový orgán, jsou to tedy veličiny, které udávají míru působnosti na lidské oko vztažené ke křivce fotopického vidění $V(\lambda)$. Označují se jako fotometrické veličiny neboli veličiny světelně-technické, mezi ně patří např. svítivost zdroje, světelný tok nebo intenzita osvětlení. Rozsah vlnových délek, se kterými fotometrie počítá je 380-780 nm, mluvíme tedy o viditelné oblasti elektromagnetického záření.

Fotometrické měření rozdělujeme do dvou skupin, vizuální (subjektivní metody měření), kde se jako indikátor využívá lidský zrak, druhá skupina se nazývá fyzikální (objektivní metody měření), ve kterých se využívají pro měření fyzikální čidla.

V současnosti se upřednostňuje měření fyzikální, které umožňuje rychle a poměrně snadné měření světelně-technických veličin, při kterém se využívají přesné přístroje vybavené fotočlánky. [11]

5.2.1 Fotočlánky

Fotočlánek je specifické zařízení obsahující detektor citlivý na světlo. V závislosti na aplikaci se volí detektor s různou spektrální citlivostí. Fotočlánek bývá součástí fotometrické hlavičky, která může také obsahovat doplňkové příslušenství, jako např. speciální filtry pro úpravu spektrální citlivosti detektoru do požadovaného rozsahu, nástavce pro směrové přizpůsobení a další konstrukční součásti. Fotodetektory mohou fungovat na principu: fotoemise (fotonky a fotonásobiče), fotovodivosti (fotorezistory) a fotovoltaičky (fotodiody, FV články). [11]

5.3 Přístroje pro měření fotometrických veličin.

5.3.1 Luxmetr

Luxmetry slouží k měření intenzity osvětlení (rovinné, kulové, polokulové aj.). Jako snímač neboli detektor je využíván křemíkový fotočlánek (fotonka) jehož výstup je snímán analogovým nebo digitálním mikroampérmetrem, který je seřízen v jednotkách intenzity osvětlení (luxech). Fotometrická hlava luxmetru je ve většině případu vybavena filtrem, který slouží pro přizpůsobení spektrální citlivosti $V(\lambda)$ a difúzním nástavcem, který slouží jako korektor směrové chyby fotodetektoru.

Snímací úhel luxmetru pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý k rovině měření intenzity osvětlení.

Použití analogových vyhodnocovacích mikroampérmetrů je vhodné při kontrole tolerancí a změn intenzity osvětlení, avšak je méně přesné a může docházet k velkým chybám. Naopak digitální ampérmetry jsou přesnější a odečítání výstupních hodnot je snadnější. [2] [10]



Obr. 7 Luxmetr [16]

5.3.2 Jasoměr

Jak již ze samotného názvu přístroje napovídá, jasoměr slouží k měření jasu. Využívá přitom stejný funkční princip jako luxmetr, avšak je navíc vybaven optikou, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo luxmetru v určitém prostorovém úhlu, kde je snímán jas integrován.

Jasoměr je schopný zaznamenat jas reálných i fiktivních povrchů vyzařujících nebo odrážejících světlo. Aby bylo pro obsluhu přístroje možné nasměrovat měřicí systém přesně na zvolené místo měření, bývají jasoměry vybaveny optickým systémem. Jasoměry můžeme rozdělit do dvou kategorií a to: bodové (malý prostorový úhel) a integrační (průměrná hodnota jasu v prostoru řádu jednotek). [2] [10]



Obr. 8 Jasoměr Minolta [17]

5.3.3 Goniofotometr

Goniometr je zařízení, které slouží k nepřímému měření rozložení křivek svítivosti zdroje v prostoru. Goniofotometr měří osvětlenost, která se následně přepočítává na svítivost. Pomocí GFM jsme schopni posoudit například vyzařovací úhel svítidla či světelného zdroje. Máme tři možná použití goniofotometru:

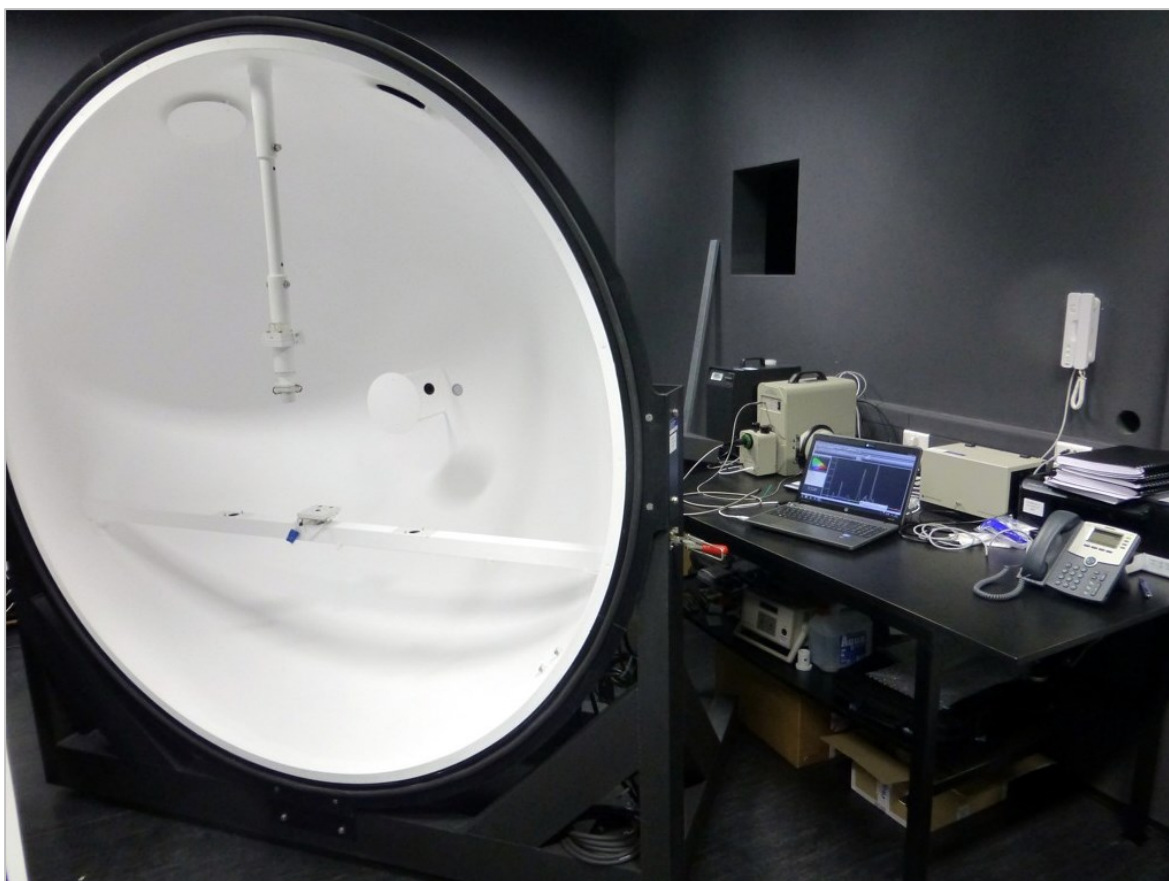
- Detektor (fotočlánek) je upevněn k lavici otáčející se okolo světelného zdroje v konstantní vzdálenosti (nejčastější použití).
- Detektor je pevně umístěn v dané poloze a zdroj světla či svítidlo se otáčí okolo něj. Tento typ použití nelze uskutečnit v případě, kdy je rozložení svítivosti závislé na poloze zdroje světla.
- Třetí možnost použití goniofotometru využívá otočného zrcadla, tato aplikace je značně složitější z hlediska konstrukční náročnosti. Detektor se zdrojem světla je pevně umístěn, tuto variantu měření lze použít pro všechny zdroje záření. [2] [10]



Obr. 9 Goniofotometr – typ pevný zdroj a otočný senzor [18]

5.3.4 Kulový integrátor

Je využíván pro měření světelného toku svítidel nebo světelných zdrojů. Dále jej můžeme využít pro měření měrných výkonů světelných zdrojů. Kulový integrátor je tvořen dutou koulí, na jejíž vnitřní stěnu jsou nanášeny nátěry, které splňují požadavek na spektrální nezávislost a zároveň mají vysokou odrazivost. Pomocí malého okénka se dovnitř kulového integrátoru umísťuje fotočlánek krytý měřicí clonou, ta zamezuje přímému dopadu světla na plochu fotočlánku. Další nezbytnou součástí kulového integrátoru je korekční žárovka, která eliminuje chyby měření, tyto chyby vznikají např. při odrazu světelného záření od neaktivních ploch (hliníkové chladiče) svítidel a dalších prvků. Velikost kulového integrátoru je ovlivněna jeho využitím, například pro měření světelných diod je vnitřní průměr kulového integrátoru 0,2 m, avšak existují i kulové integrátory s vnitřním průměrem 3 m, které slouží pro měření svítidel o rozměrech až dva metry. [2] [10]



Obr. 10 Kulový integrátor, geometrie měření 4π [19]

5.4 Měření fotosyntetických veličin

Světlo je z fyzikální podstaty je složitý jev, a proto není možné ho měřit snadno jako například teplotu, hmotnost nebo vlhkost ve vzduchu. Celá škála světelných zdrojů od slunce přes vysokotlaké výbojky až po LED diody má specifickou charakteristiku vyzařovaného spektra vlnových délek s různou intenzitou.

Pro pěstební účely jsou důležité tyto tři vlastnosti světla:

- zářivý tok – celkové množství světelné energie dopadající na povrch,
- spektrální kvalita – skladba a intenzita vyzařovaného spektra
- doba trvání – doba osvětlení

Správným rozložením těchto tří parametru světla jsme schopni určit množství energie potřebné k fotosyntéze rostlin. [20]

5.5 Pístroje pro měření fotosyntetických veličin

Správné rozložení a skladba světla ve sklenících či pěstebních boxech začíná měřením. Existují dva hlavní typy senzorů používaných k měření množství a typu světla: kvantové senzory a přenosné spektrometry. [20]

5.5.1 Kvantové senzory

Kvantové senzory jsou povětšinou malé a přenosné zařízení, které mají i poměrně nízkou pořizovací cenu. V horní části pouzdra snímače je difuzor, který je schopný kosinové korekce, což znamená, že je stejně citlivý na světlo dopadající ze všech úhlů a směrů nad difuzorem. Tento difuzor směřuje světlo do těla krytu senzoru, kde se nachází filtr, který propustí světlo pouze ve spektrální oblasti FAR (400-700 nm). Zachycené množství fotonů v oblasti FAR se projeví na fotodiodě prostřednictvím nárustu či poklesu průchodu elektrického proudu. Velikost proudu tedy bude přímo úměrná s intenzitou FAR, Kvantové senzory s kosinovou korekcí poskytují nejpřesnější měření záření na rovném povrchu ze všech úhlů, což se dá dobře použít pro potřeby měření ve sklenících. [21]



Obr. 11 Kvantový snímač/senzor [21]

Pomocí tohoto senzoru jsme schopni změřit hodnotu PPFD, které rostliny přijímají v době měření. Dále můžeme pomocí kvantového senzoru změřit celkové množství světla, které rostliny denně přijímají (DLI), ale jen v případě, pokud přidáme k samotnému senzoru datový záznamník, který bude počítat v každé jedné sekundě PPFD. [21]

5.5.2 Spektrometry

Spektrometr, typ měřicího přístroje, který je schopen měřit intenzitu ozáření světelného zdroje v různých částech světelného spektra. Můžeme měřit světlo z viditelné oblasti spektra i mimo něj. Pomocí spektrometru jsme schopní určit z jakých spektrálních barev se námi měřené světlo skládá. To je velmi důležité, protože dvě různá světla se pouhým okem mohou zdát jako stejná, ale měřením pomocí spektrometru zjistíme, že tomu nemusí tak být, spektrální složení světla se bude lišit. Díky této informaci můžeme předejít stavu, kdy osvěcujeme rostliny nevhodným spektrálním rozložením pro jejich správný vývoj a růst. [2] [20]



Obr. 12 Spektrometr [22]

6 SVÍTIDLA A SVĚTELNÉ ZDROJE LED PRO PĚSTOVÁNÍ ROSTLIN

Použití technologie LED přináší do odvětví zemědělství zcela nové možnosti, mezi ně patří snížení spotřeby energie, vysoká střední doba života LED čipu, snížení velikosti a hmotnosti svítidel samotných a schopnost optimalizovat světelné spektrum pro danou aplikaci, která je pro zahradnické LED osvětlení klíčová, ve smyslu rychlosti růstu a maximalizování úrody.

Trh s umělým osvětlením pro pěstování rostlin je v dnešní době velmi nasycený a různorodý. Pěstební osvětlení je využíváno ve velkých sklenících jako podpůrný zdroj světla v momentě, kdy slunečnímu záření brání vysoká oblačnost nebo je doba slunečního svitu omezena roční dobou a geografickou polohou skleníku. Dnes jsou také v rozmachu projekty výstavby vertikálních hydroponických pěstebních hal, ve kterých se čistě pod umělým osvětlením pěstuje široká paleta salátu či bylinek. Pěstební svítidla se již také dostaly do rukou běžných spotřebitelů, kteří je využívají pro pěstování bylin přímo v místě spotřeby (ve vlastní kuchyni). Případně pro celoroční pěstování zeleniny v takzvaných pěstebních stanech. [23]

6.1 Parametry určující kvalitu svítidla pro pěstební účely

Porovnání pěstebních svítidel probíhá na základě parametrů PPF a PPFD, které poskytují informaci o počtu fotonů, které jsou emitovány světelným zdrojem za sekundu ve spektrální oblasti FAR (400-700 nm), případně počet fotonů za sekundu na danou plochu.

Spektrální složení vyzařovaného spektra svítidla:

Pro dosažení svítidla s vysokou fotosyntetickou účinností pro danou plodinu je nutno znát její spektrální relativní citlivost na dané spektrum v oblasti FAR (400-700 nm). Obecně platí, že rostliny mají největší spektrální citlivost v oblasti vlnové délky 450-475 nm a 620-700 nm. Mluvíme tedy o modré a červené spektrální barvě. Nicméně, aby světelné spektrum dopadající na rostliny, bylo co možná nejbližší křivce PAR využívají se světelné diody se širším spektrem vyzařování, například diody s náhradní teplotou chromatičnosti 3000K. Křivku PAR a další křivky popisující spektrální citlivost rostlin na světlo, popíši v samostatné kapitole níže. Dalším důležitým parametrem LED je zářivý tok, který je schopná dioda vyzářit z daného příkonu. Podíl zářivého toku a dodaného příkonu je zářivá účinnost, udávána v procentech.

Porovnávání svítidel pomocí hodnot PPF:

Toto porovnání patří mezi objektivní metody hodnocení, s velmi dobrou výpovědní hodnotou. Kvantifikovat vliv různých spekter na růst rostliny je velice obtížné, hodnota PPF uvádí konkrétní čísla, díky kterým je zřejmé, jaké svítidlo má vyšší/lepší počet vyzářených fotonů za sekundu. Srovnáme tedy hodnoty PPF uvedené v katalogových listech výrobců, nicméně tato metoda přímo závisí na dostupnosti a kvalitě dat udávaných výrobcem. [24]

Porovnání svítidel na základě PPE:

Hodnota fotosyntetické účinnosti fotonů je ekvivalent veličiny měrné světelné účinnosti jen s rozdílem, kdy namísto světelného toku dosazujeme hodnotu fotosyntetického toku fotonů. Mluvíme tedy o podílu PPF a příkonu P. Fotosyntetická účinnost fotonů svítidla pro pěstební účely je udávána v jednotkách $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ nebo také $\mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$. Převod mezi jednotkami je v poměru 1:1. [14]

Tab. 2 Kategorie fotosyntetické účinností fotonů svítidel [25]

0,7-1,0 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	Velmi špatná účinnost
1,0-1,3 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	Špatná účinnost
1,3-1,6 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	Dobrá účinnost
1,6-2,0 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	Velmi dobrá účinnost
2,0 a více $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$	Vynikající účinnost

Pro přesné stanovení účinnosti je důležité počítat také s elektrickou účinností zdroje napájení svítidla a také použité optiky. [14]

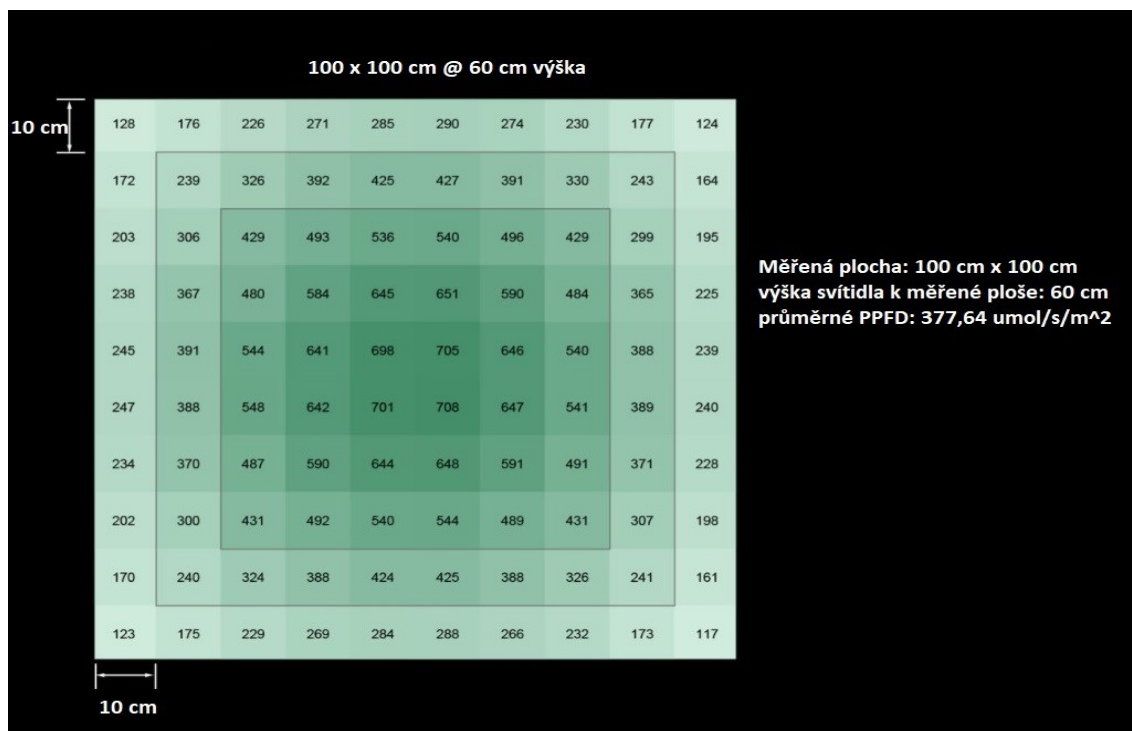
Porovnání na základě PPFD:

PPFD neboli fotosyntetická hustota fotonového toku popisuje kolik fotosyntetického toku fotonů (PPF), které přispívají k fotosyntéze, dopadá na rostlinu za sekundu a na danou plochu (rostlinu). Měření pro každý jeden typ svítidla probíhá na základě vzdálenosti měřené plochy od svítidla a zvolené velikosti měřené plochy, která se následně rozdělí na určitý počet segmentů, ve kterých probíhá měření, čím více segmentů tím vyšší přesnost měření. V každém segmentu je měřena úroveň PPF, která je zaznamenávána kvantovým senzorem. Pomocí hodnot PPF zaznamenaných v každém ze segmentů měřící plochy, vytvoříme takzvanou mapu světelné stopy neboli graf PPFD viz Obr. 13. Výsledná hodnota PPFD nezáleží pouze na hodnotě PPF, ploše osvětlované plochy a vzdálenosti mezi svítidlem a senzorem, ale také na vyzařovacím úhlu svítidla a geometrické velikosti zářivých ploch svítidla. Mimo tyto parametry je nutno vzít v potaz to, že každý výrobce využívá své vlastní laboratoře, která má specifické podmínky. Tím je myšleno typ použitého kvantového senzoru, odrazivost měřené plochy a další. [26]

Výstup měření PPFD tvoří povětšinou tři parametry, průměrná hodnota PPFD, minimální hodnota PPFD a maximální hodnota PPFD. [26]

Tab. 3 Doporučené hladiny PPFD pro různé fáze růstu [27]

Vysemenění	100-300	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Klonování	100-200	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Vegetativní	600-900	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Přechod	1000+	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
Kvetení	1000+	$\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$



Obr. 13 Mapa světelné stopy / Graf PPFD [13]

6.2 Typy svítidel využívané pro pěstební účely

6.2.1 Konstrukční části svítidla

6.2.1.1 Světelně činné části svítidla

Rozdělení LED čipu:

- LED se středním výkonem typu PLCC – tyto LED čipy jsou uzpůsobeny pro povrchovou montáž, spotřebovávají méně než jeden watt elektrické energie, patří mezi nejrozšířenější a nejprodávanější typy světelných diod pro všeobecné i pro zahradnické osvětlování. PLCC znamená, že samotný čip je uložen v plastovo-olověném nosiči. Výhody: relativně dobrá účinnost a nízká pořizovací cena. Nevýhody: špatná odolnost proti světelné a tepelné degradaci. [28]
- Vysoce výkonné LED diody – mohou být napájeny proudem od stovek mA až do více než 1 A, mají robustnější konstrukci oproti světelným diodám PLCC, pouzdro vysoce výkonné LED je vyrobené z keramiky, a navíc je pokoveno pro lepší obvod tepla od čipu. Tento typ LED může vyprodukovat více než $10 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ z jediného čipu. Výhody: odolnost součástky, výborná účinnost, nevýhody: relativně vysoká cena. [28]
- Chip-on-board (COB) LED diody – oproti PLCC a vysoce výkonným LED diodám mají nesrovnatelně větší rozměry, COB světelná dioda se skládá z několika LED čipů, které jsou umístěny na jedné desce plošných spojů s kovovým jádrem (MCPCB), nebo z keramiky. Takovýto plošný spoj zajišťuje výborný odvod tepla a vhodnou kontaktní plochu pro montáž

chladiče. Z čipu COB je možné získat až stovky $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ z jediného čipu, lépe řečeno z několika čipů umístěných v bezprostřední blízkosti. [28]

6.2.1.2 Chladič

Chladič svítidla může být proveden z hliníkového profilu, do kterého se upevňuje plošný spoj osazený LED diodami nebo LED pásek osazený danými diodami. Upevnění k samotnému profilu je zajištěno šrouby či teplo vodivou oboustrannou lepící páskou. V případě upevnění šrouby se mezi styčnou plochu chladiče a plošného spoje nanáší teplo vodivá pasta, která zajišťuje bezproblémový odvod tepla z LED čipů. Další typy chladičů: lisované hliníkové chladiče, žebrované hliníkové chladiče.

6.2.1.3 Difuzor a optiky

Difuzory použité u lineárních svítidel pro pěstební účely jsou povětšinou čiré, s co možná nejmenšími světelnými ztrátami. Tento typ difuzorů je možné zvolit, protože rostliny nereagují na nežádoucí oslněním. Řada hliníkových profilů společně s difuzorem a příslušnými koncovkami získá určitý stupeň ochrany proti vniku vody a prachových částic. [29]

V některých případech výrobci přímo na desku plošných spojů, osazenou led čipy a upevněnou v chladiči, použijí akrylovou konformní vrstvu, pomocí které zamezí přístup vody a prachu k samotným LED čipům. [30]

Optické čočky se využívají pro usměrnění nebo rozšíření úhlu vyzařování dané LED. V pěstebních podmínkách se využívají převážně čočky rozšiřovací, které slouží k rovnoměrnějšímu rozložení vyzářeného toku. Nejčastěji se využívají při aplikaci COB čipů (Chip on Board).

6.2.1.4 Napájecí zdroj

Napájecí zdroje pro LED svítidla. LED diody musejí být napájeny konstantním proudem, jelikož v případě, kdy změněme napětí v propustném směru diody zhruba o 2,5 %, změní se proud protékající diodou o 16 %, přičemž samotné napětí LED diody je v propustném směru do značné míry závislé na teplotě přechodu. Tyto změny teplot mohou způsobit změny napětí v řadu až 20 %. Jas diody nebo také zářivý tok diody je úměrný proudu, který protéká diodou. Jestliže bude napájecí proud diody kolísat bude kolísat i její jas či zářivý tok, a proto je nutné LED diody napájet zdrojem konstantního proudu. [31]

V případě LED diod pro pěstební účely tomu není jinak. Nicméně zdroje konstantního proudu pro dané využití musí splňovat několik požadavků. Myslí se tím robustný kryt nejčastěji vyroben z hliníku, ten sám osobě zajišťuje chlazení elektronických částí zdroje, kryt musí dále splňovat určitý stupeň ochrany, nejlépe stupeň IP 67. V případě, kdy se dané svítidlo využívá pro všechny fáze růstu a fázi květu rostliny je vhodné použít zdroj s nastavitelným stmíváním, funkce Dimming. [30]

6.2.2 LED lineární svítidla

Lineární LED svítidla mají širokou škálu využití, používají se pro vertikální farmy či pěstování microgreens. Lineární jednořadá svítidla jsou vhodná do úzkých pěstebních prostor, kde se svítidla řadí za sebe do série. [32]

Lineární svítidla je možné řadit vedle sebe a vytvořit svítidlo víceřadé, které se využívají pro velkoplošné pokrytí pěstebního prostoru a dosažení co možná nejvyššího průměrného PPFD. [32]



Obr. 14 Lineární pěstební svítidlo, jednořadá [32]



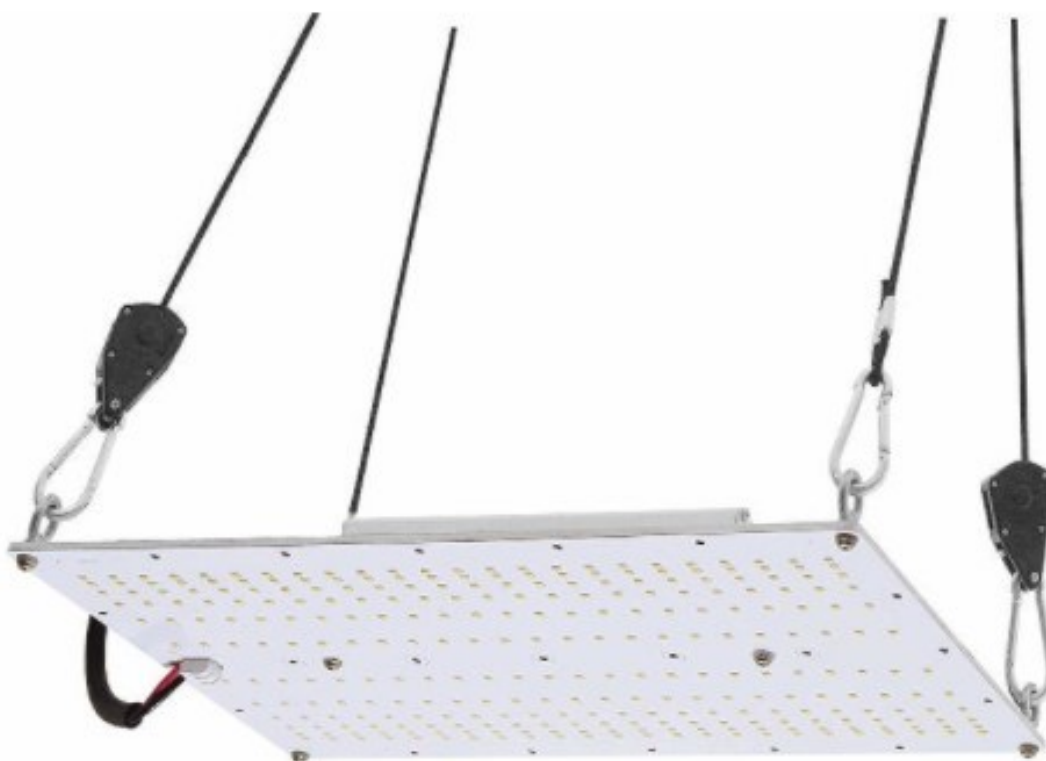
Obr. 15 Lineární víceřadá pěstební svítidlo Lumatek Zeus [33]

6.2.3 LED svítidla konstrukce Quantum Board

Quantum Board v překladu kvantová deska je typ svítidla vytvořený pro pěstební účely. V zásadě se jedná o svítidlo v podobě poměrně velké desky plošných spojů s kovovým jádrem (MCPCB), která je rovnoměrně osazená světelnými diodami (PLCC – diody se středním výkonem). Napájení je zajištěno zdrojem konstantního proudu, který je často umístěn na samotném svítidle. K desce plošných spojů je často přišroubován přídatný hliníkový chladič.

Výhody: rovnoměrné rozložení vyzařovaného záření, možnost přizpůsobení výstupního spektra pro danou aplikaci (plodinu), pasivní chlazení.

Nevýhody: špatná ochrana proti vniknutí vody nebo prachu (někteří výrobci tento problém již vyřešili vylepšenou konstrukcí svítidla). [34]



Obr. 16 Svítidlo koncepce Quantum Board [35]

6.2.4 Pěstební svítidla typu COB

Vlastnosti použitých COB čipů se využívají v pěstebních svítidlech tohoto typu. Na velmi malé ploše je osazeno relativně velké množství LED diod, které tak tvoří jeden světelný bod. Tento světelný bod má jen omezený úhel vyzařování, proto se využívá funkce reflektoru (optických čoček) k zvětšení úhlu vyzařování. Tím dosáhneme schopnosti osvětlit větší plochu. Pěstební svítidlo je ve většině případů složeno ze samotného COB čipu, hliníkového lisovaného chladiče, ke kterému se často přidává ventilátor, a napájecího zdroje.

Výhody: jednoduchá konstrukce, vysoký výkon, v závislosti na konstrukci svítidla je možný určitý stupeň ochrany proti nežádoucímu vniku vody či prachu.

Nevýhody: vyšší provozní teploty (lze omezit vhodným dimenzováním chladiče), nemožnost snadného přizpůsobení vyzařovaného spektra. [36]



Obr. 17 Svítidlo typ COB [37]

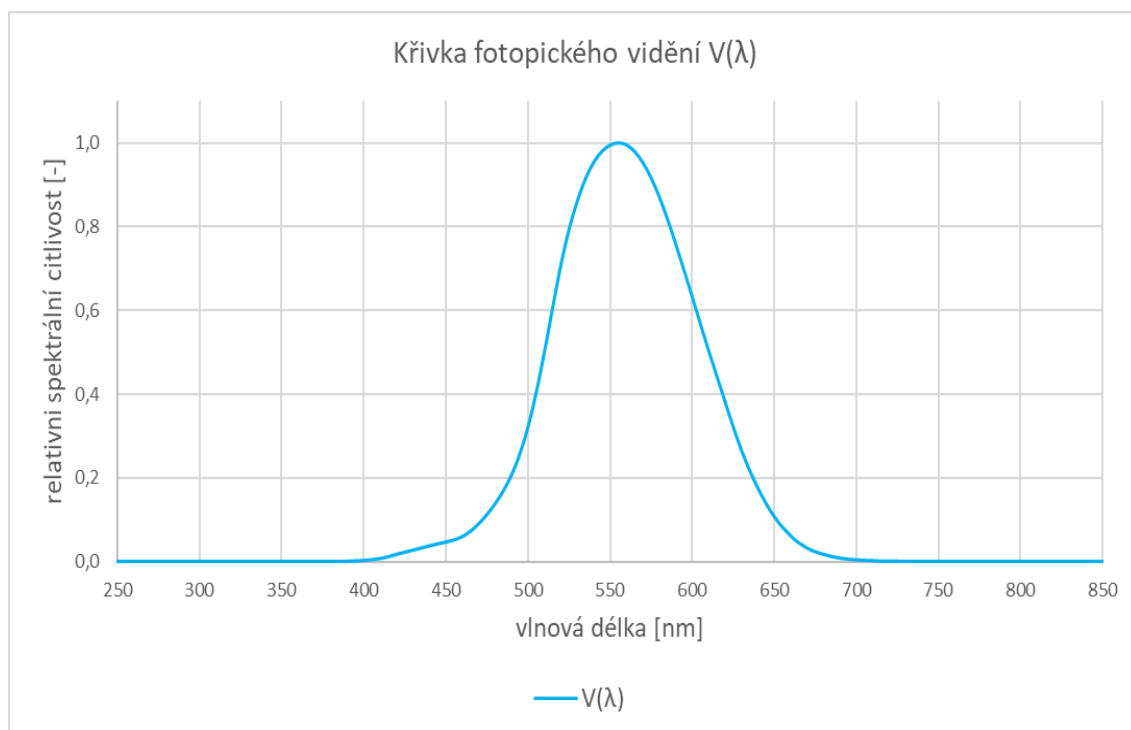
7 VÝPOČET PARAMETRŮ VYBRANÝCH LED ČIPŮ A POROVNÁNÍ VÝPOČTŮ S KATALOGOVÝMI HODNOTAMI

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo měření a následné vyhodnocení fotometrických, výkonových a PAR parametru svítidla a světelných diod. Nicméně měření ve fotometrické laboratoři nemohlo proběhnout z důvodu vyhlášení celoplošného nouzového stavu kvůli onemocnění COVID 19. Proto se tato bakalářská práce nezabývá měřením a vyhodnocováním těchto parametrů, ale vytvořením výpočetní metody parametrů fotometrických a PAR.

Metoda spočívá na způsobu výpočtu světelného toku a fotonového fotosyntetického toku, pomocí zářivého toku a relativního spektra vyzařování dané světelné diody v závislosti na spektrální citlivosti lidského oka a spektrální citlivosti rostlin. Tyto spektrální citlivosti jsou popsány pomocí křivek relativní spektrální citlivosti. Křivka spektrální citlivosti $V(\lambda)$, která posuzuje citlivost lidského oka na dané spektrum světla a křivka PAR posuzující citlivost rostlin na dané spektrum světla.

7.1 Křivka popisující spektrální citlivost lidského oka

Křivka $V(\lambda)$ neboli křivka fotopického vidění popisuje spektrální citlivost lidského oka na světlo v dané vlnové délce, největší možná citlivost se nachází v 555 nm (žlutozelená barva). V tomto bodě má lidské oko největší možnou měrnou světelnou účinnost, $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Tuto měrnou světelnou účinnost označíme jako K_m a využijeme jí pro výpočet světelného toku. [2] [10]



Obr. 18 Křivka fotopického vidění $V(\lambda)$

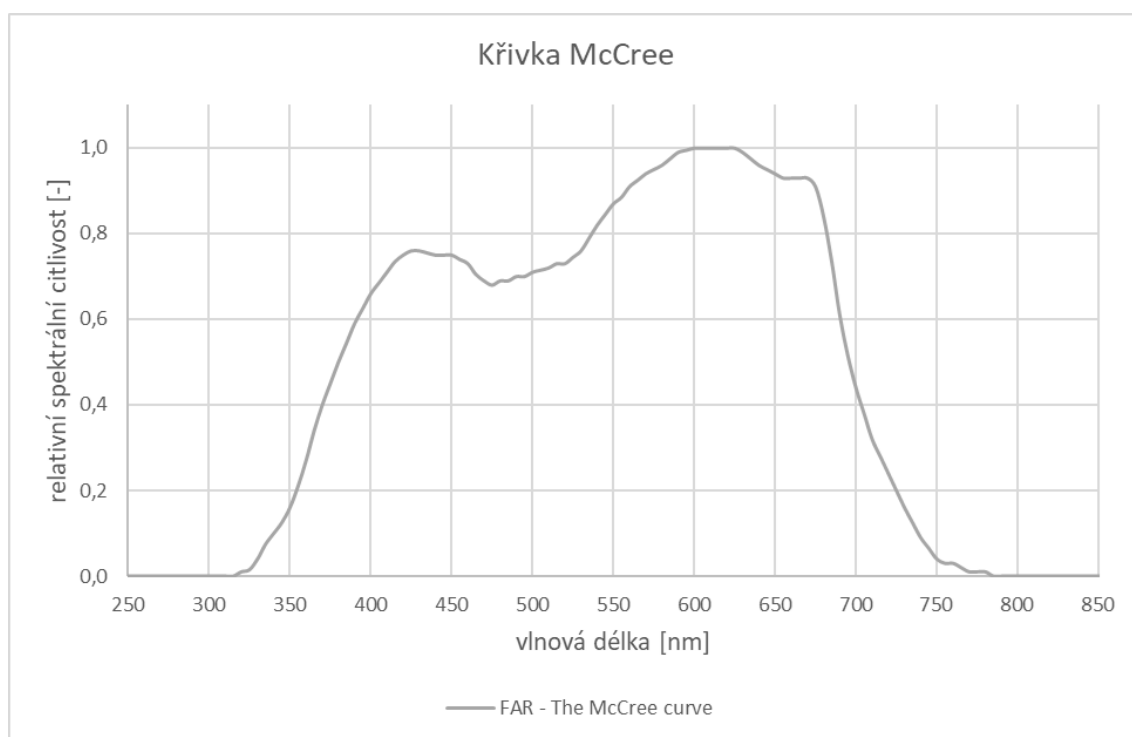
7.2 Křivky popisující spektrální citlivost rostlin

Pro správný vývoj a růst rostlin je důležitý faktor množství dopadajícího záření na povrch rostliny, ale také spektrální složení onoho světla/záření. Toto spektrální složení je definováno takzvanými křivkami relativní spektrální citlivosti rostlin. [38]

7.2.1 Křivka relativní spektrální citlivosti FAR (The McCree curve)

Dr. Keith. J. McCree v sedmdesátých letech 20. století zpracoval rozsáhlou publikaci, ve které se zabýval schopností absorpce světla (v intervalu vlnových délek od 320 do 780 nm) více jak dvou desítek druhů rostlin. Cílem těchto měření bylo určit základní definici fotosynteticky aktivního záření. V měření byly zahrnuty faktory jako například: druh a odrůda rostlin, stáří rostliny a místo růstu (pole nebo pěstební místnost).

Výsledná křivka McCree je zprůměrovaná absorpce světla různých druhů rostlin. Dalo by se říct, že každý jednotlivý druh a odrůda bude mít křivku absorpce světla jedinečnou. [38]



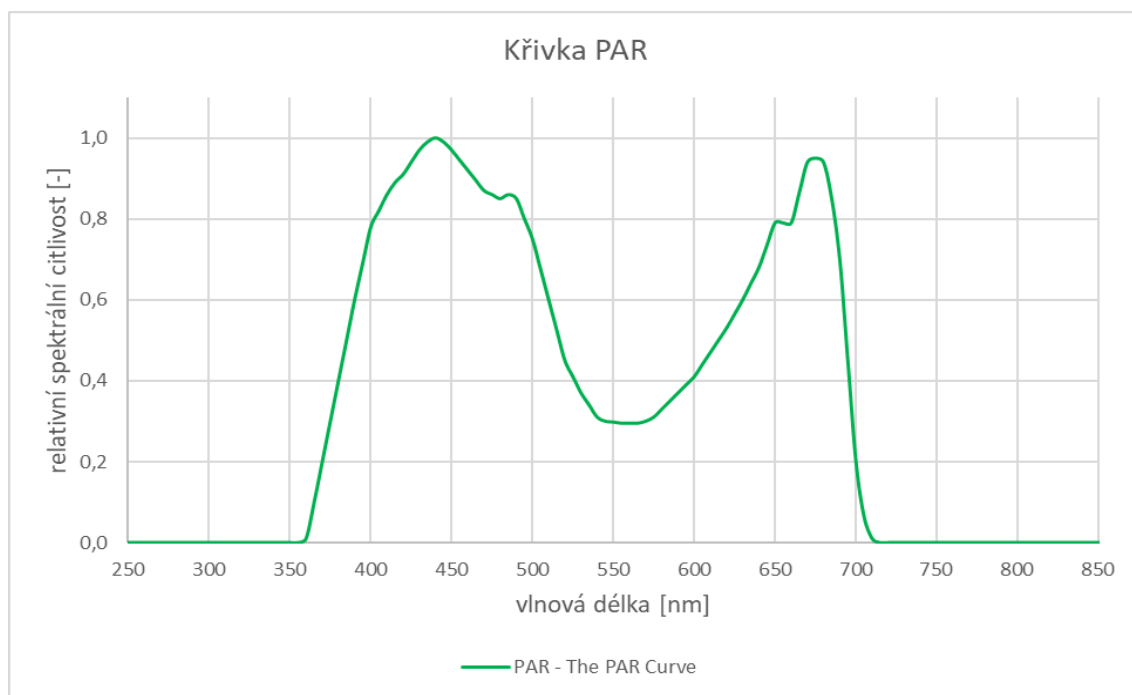
Obr. 19 Křivka relativní spektrální citlivosti McCree [38]

7.2.2 Křivka PAR

Křivka PAR je nejužívanější a nejstarší způsob určování spektrální citlivosti rostlin. Podobně jako u křivky McCree je PAR křivka tvořena průměrnou hodnotou absorpce světla různých typů rostlin.

Na křivce PAR leží dva vrcholy. První z nich se nachází v oblasti modré barvy (cca 440nm) a druhý v oblasti červené barvy (cca 675 nm). Na druhou stranu v oblasti zelené barvy (cca 555nm) je značný propad spektrální citlivosti rostlin, tuto spektrální oblast záření umí rostliny využít jen částečně a ve značné míře toto záření odráží (tato skutečnost má za následek to, že většinu rostlin vnímáme jako

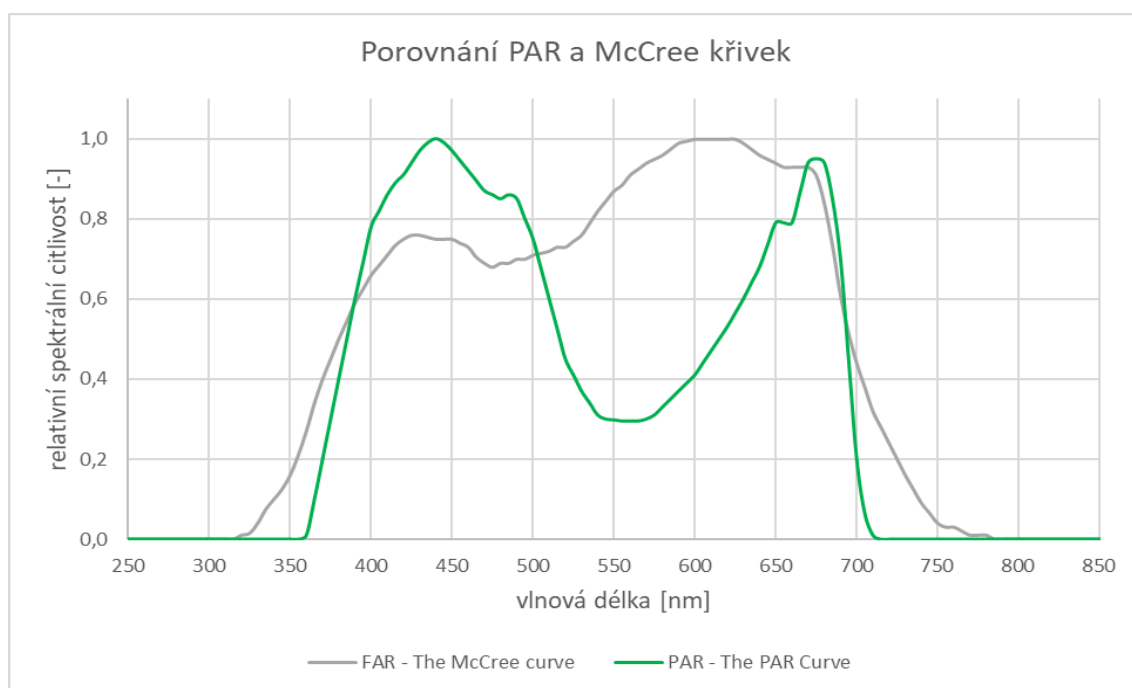
zelené objekty). Naopak červené a modré světlo rostliny vstřebávají a dále ho využívají pro přeměnu látek. [38]



Obr. 20 Křivka PAR [38]

7.2.3 Srovnání křivek McCree a PAR

Při pohledu na křivky McCree a PAR jsou zřetelně odlišné absorpční vrcholy rostliny. Porovnání křivky McCree s křivkou PAR ukazuje, že rostliny potřebují více záření UV-A a UV-B, dále méně modrého světla, ale za to více světla zeleného až oranžového a také méně světla v oblasti tmavě červené. [38]



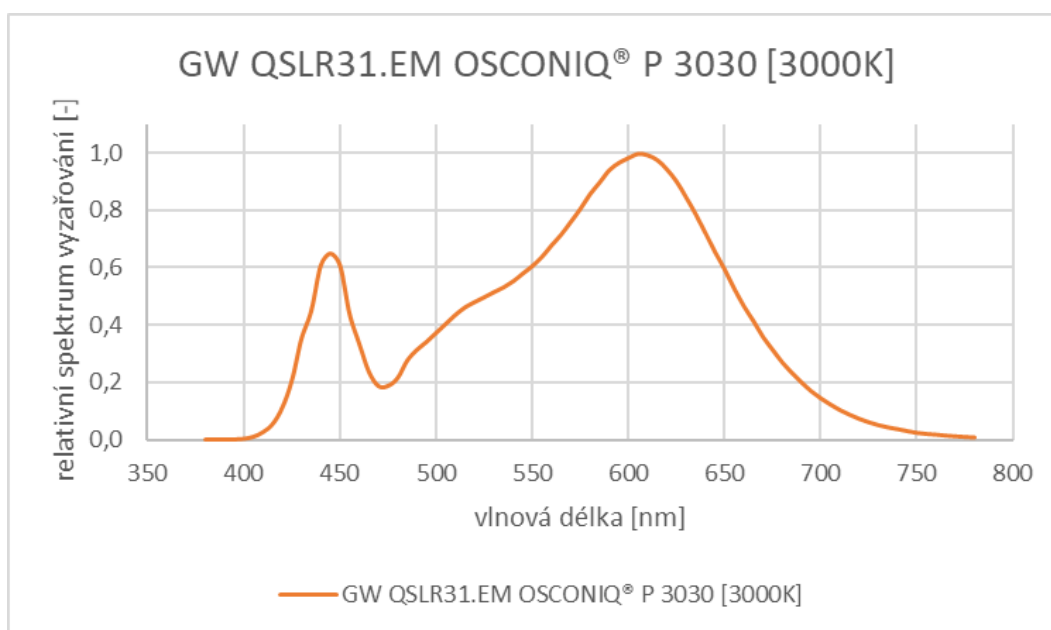
Obr. 21 Porovnání křivek PAR a McCree [38]

7.3 Vybrané světelné diody a jejich katalogové parametry

Pro výpočet a následné srovnání vypočtených hodnot s hodnotami z katalogových listů byly zvolené světelné diody výrobce OSRAM řady OSCONIQ, které spadají do kategorie světelných diod určených pro osvětlování rostlin. LED byly vybrány na základě spektrální citlivosti rostlin, která je největší v oblasti modrého a červeného spektra, modrá spektrální oblast příznivě ovlivňuje rychlost a kvalitu růstu, naopak červená oblast kladně působí na kvalitu kvetení. Proto byly vybrány světelné diody DEEP BLUE a HYPER RED. Nicméně rostliny do jisté míry vnímají a využívají světlo i z okolních spektrálních oblastí. Proto jako poslední LED byla vybrána bílá LED s teplotou chromatičnosti 3000K, která pokrývá mnohem širší oblast spektrální oblast FAR, než světelné diody DEEP BLUE a HYPER RED.

Tab. 4 Katalogové hodnoty bílé světelné diody 3000K [39]

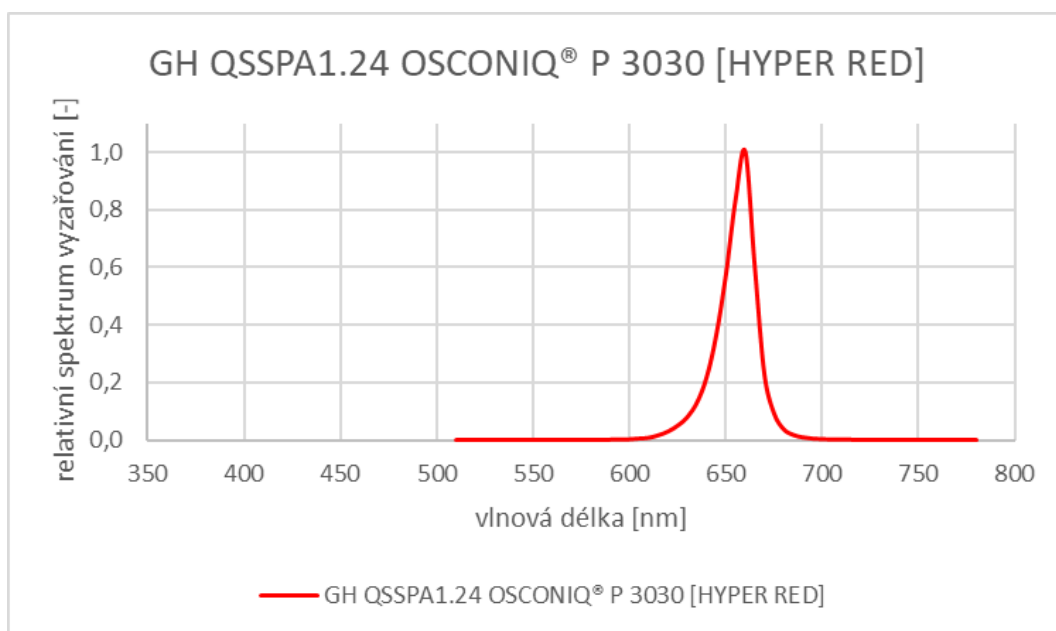
GW QSLR31.EM OSCONIQ® P 3030 [3000K]							
Úhel vyzařování	=	120	°	Jmenovitý proud	=	0,15	A
Zářivý tok	=	0,453	W	Jmenovité napětí	=	6,15	V
Zářivá účinnost	=	49	%	Příkon	=	0,9225	W
PPF	=	-	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	Světelný tok	=	150	lm



Obr. 22 Spektrum LED 3000K [39]

Tab. 5 Katalogové hodnoty světelné diody HYPER RED RED [40]

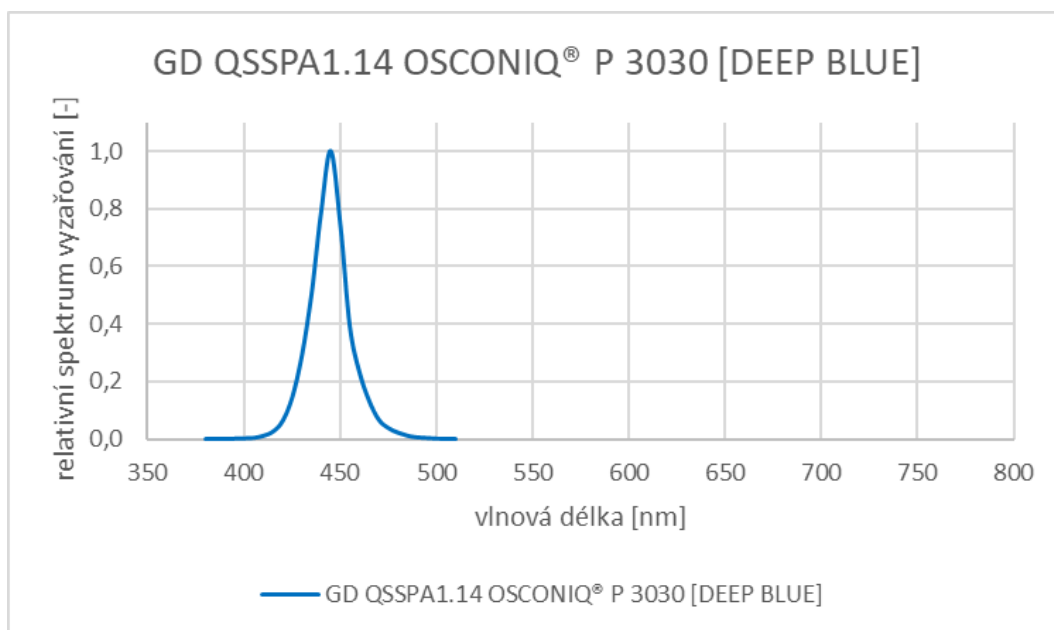
GH QSSPA1.24 OSCONIQ® P 3030 [HYPER RED]							
Úhel vyzařování	=	130	°	Jmenovitý proud	=	0,35	A
Zářivý tok	=	0,44	W	Jmenovité napětí	=	2,1	V
Zářivá účinnost	=	59	%	Příkon	=	0,735	W
PPF	=	2,37	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	Světelný tok	=	29,9	lm



Obr. 23 Spektrum LED HYPER RED [40]

Tab. 6 Katalogové hodnoty světelné diody DEEP BLUE [41]

GD QSSPA1.14 OSCONIQ® P 3030 [DEEP BLUE]							
Úhel vyzařování	=	120	°	Jmenovitý proud	=	0,35	A
Zářivý tok	=	0,7	W	Jmenovité napětí	=	2,85	V
Zářivá účinnost	=	70	%	Příkon	=	0,9975	W
PPF	=	2,64	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$	Světelný tok	=	25,2	lm



Obr. 24 Spektrum LED DEEP BLUE [41]

Data pro vykreslení křivky relativního spektra vyzařování v závislosti na vlnové délce jsem získal z webu výrobce OSRAM, který ke svým výrobkům nabízí podrobnou knihovnu technických dat a parametrů. Data jsem zpracovával v programu Excel.

7.4 Postup výpočtu světelného toku a fotosyntetického toku fotonů v programu Excel

7.4.1 Výpočet světelného toku

1. Výpočet probíhal v oblasti viditelného elektromagnetického záření v rozsahu od 380 do 780 nm, rozsah vlnové délky jsem rozdělil na 81 buněk, krok po 5 nanometrech (380 ; 385; 390; ...), protože data použité křivky $V(\lambda)$, jsem získal právě v této posloupnosti vlnové délky.
2. Ke každé vlnové délce jsem přiřadil odpovídající hodnotu relativního spektra vyzařování dané LED.
3. Následovala normalizace relativního spektra vyzařování pro 1 W vyzařovaného výkonu, tento krok jsem provedl sečtením/sumou všech hodnot relativního spektra vyzařování a následně podílem relativního spektra vyzařování pro příslušnou vlnovou délku se sumou celého sloupce relativního spektra vyzařování. Tímto krokem jsem získal sloupec udávající spektrální hodnoty záření pro danou vlnovou délku $\Phi_e(\lambda)$ ve $\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$.
4. Výpočet spektrálního přenosu na lidské oko: vypočítaný sloupec hodnot z kroku č.3 se vynásobí sloupcem hodnot, ve kterém jsou obsaženy hodnoty křivky fotopického vidění $V(\lambda)$. Tímto krokem vznikne nový sloupec, u něj opět provedeme sumu a díky tomu získáme spektrální přenos záření na lidské oko.
5. Výsledný spektrální přenos záření na lidské oko vynásobíme měrnou světelnou účinností lidského oka ($683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$) a výrobcem udaným zářivým tokem počítané LED. Tímto získáme výslednou hodnotu světelného toku v lumenech.

Výše popsaný postup výpočtu světelného toku vychází z tohoto vzorce:

$$\Phi = 683 \cdot \sum_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$$

Tab. 7 Tabulka výsledků: Světelný tok

	Vypočtený světelný tok Φ (lm)
WHITE 3000K	141,80
HYPER RED	28,82
DEEP BLUE	21,50

Výsledky z tabulky jsou zaokrouhlené na dvě desetinná místa.

7.4.2 Výpočet fotosyntetického toku fotonů (PPF)

1. Výpočet probíhal v oblasti FAR v rozsahu vlnových délek od 400 do 700 nm. Rozsah vlnové délky jsem rozdělil na 61 buněk, krok po pěti nanometrech (400; 405; 410; ...), protože získaná data spektrální citlivosti rostlin použité křivky PAR jsou příslušná právě k těmto vlnovým délkám.
2. Ke každé vlnové délce jsem přiřadil příslušnou hodnotu relativního spektra vyzařování dané LED.
3. Následovala normalizace relativního spektra vyzařování pro 1 W vyzařného výkonu, tento krok jsem provedl sumou všech hodnot relativního spektra vyzařování a následně provedl podíl relativního spektra vyzařování pro příslušnou vlnovou délku se sumou celého sloupce relativního spektra vyzařování. Tímto krokem jsem získal sloupec udávající spektrální hodnoty záření pro danou vlnovou délku $\Phi_e(\lambda)$ ve $\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$.
4. Rozdíl nastává ve výpočtu spektrálního přenosu záření (krok č.4 z výpočtu světelného toku), kdy chceme vypočítat spektrální přenos záření na rostlinu, proto je nutné křivku fotopického vidění zaměnit za křivku PAR, sečtením tohoto spektrálního přenosu záření v každé vlnové délce získáme celkovou hodnotu spektrálního přenosu na rostlinu.
5. Výslednou hodnotu z kroku č. 2 vynásobíme výrobcem udaným zářivým tokem počítané LED a citlivostí rostlin ($0,008359 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$). Tímto získáme hodnotu fotosyntetického toku fotonu (PPF) v mikromolech za sekundu.

Výše popsaný postup výpočtu fotosyntetického toku fotonů vychází z tohoto vzorce:

$$PPF = 0,008359 \cdot \sum_{400}^{700} \Phi_e(\lambda) \cdot PAR(\lambda)$$

Tab. 8 Tabulka výsledků: fotosyntetický tok fotonů

	Vypočtený PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)
WHITE 3000K	2,13
HYPER RED	2,88
DEEP BLUE	5,65

Výsledky z tabulky jsou zaokrouhlené na dvě desetinná místa.

7.5 Vyhodnocení výpočtu a porovnání výsledku s katalogovými hodnotami

Pro lepší kvantifikování výsledných hodnot jsem provedl přepočty výsledných parametrů na 1 W příkonu. Převodní konstantu (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$) jsem vypočítal jako podíl měrného světelného výkonu zdroje a fotosyntetické účinnosti fotonů zdroje.

Tab. 9 Srovnávací tabulka výsledných parametrů LED vztažených k 1 W příkonu

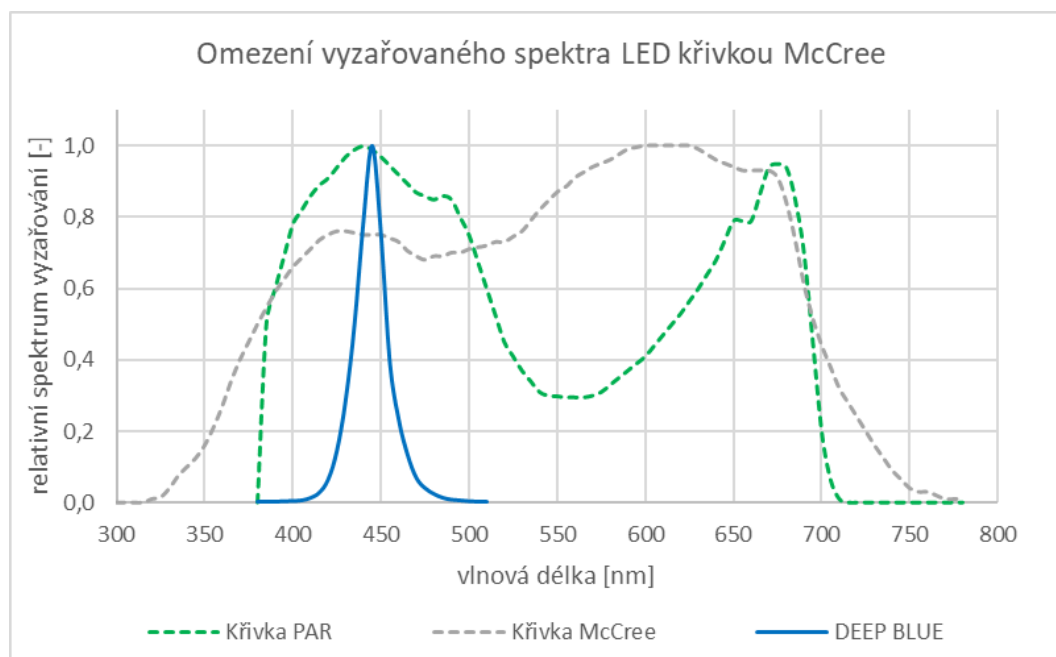
GW QSLR31.EM OSCONIQ® P 3030 [3000K]			
Hodnoty vztaženy k příkonu 1 W			
Zářivý tok Φ_e	=	0,491	W
Světelný tok Φ	=	153,694	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	2,309	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Měrný světelný výkon zdroje	=	153,694	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
Fotosyntetická účinnost fotonů zdroje PPE	=	2,309	$\mu\text{mol}\cdot\text{W}^{-1}$
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	=	66,558	-
GH QSSPA1.24 OSCONIQ® P 3030 [HYPER RED]			
Hodnoty vztaženy k příkonu 1 W			
Zářivý tok Φ_e	=	0,598	W
Světelný tok Φ	=	39,167	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	3,918	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Měrný světelný výkon zdroje	=	39,167	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
Fotosyntetická účinnost fotonů zdroje PPE	=	3,918	$\mu\text{mol}\cdot\text{W}^{-1}$
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	=	9,998	-
GD QSSPA1.14 OSCONIQ® P 3030 [DEEP BLUE]			
Hodnoty vztaženy k příkonu 1 W			
Zářivý tok Φ_e	=	0,7	W
Světelný tok Φ	=	21,5	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	5,653	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Měrný světelný výkon zdroje	=	21,5	$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$
Fotosyntetická účinnost fotonů zdroje PPE	=	5,653	$\mu\text{mol}\cdot\text{W}^{-1}$
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	=	3,802	-

Vynásobením PPF převodní konstantou získáme hodnotu světelného toku. Naopak pokud podělíme světelný tok převodní konstantou získáme PPF.

Tab. 10 Srovnání vypočtených hodnot a hodnot výrobce

GW QSLR31.EM OSCONIQ® P 3030 [3000K]			
Vypočtené hodnoty			
Světelný tok Φ	=	141,8	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	2,13	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Hodnoty výrobce			
Světelný tok Φ	=	150	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	-	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Rozdíl vypočtených a katalogových hodnot			
Rozdíl ve výpočtu Světelného toku	=	5,47	%
Rozdíl ve výpočtu PPF	=	-	%
GH QSSPA1.24 OSCONIQ® P 3030 [HYPER RED]			
Vypočtené hodnoty			
Světelný tok Φ	=	28,8	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	2,88	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Hodnoty výrobce			
Světelný tok Φ	=	29,9	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	2,37	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Rozdíl vypočtených a katalogových hodnot			
Rozdíl ve výpočtu Světelného toku	=	3,68	%
Rozdíl ve výpočtu PPF	=	21,52	%
GD QSSPA1.14 OSCONIQ® P 3030 [DEEP BLUE]			
Vypočtené hodnoty			
Světelný tok Φ	=	21,5	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	5,65	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Hodnoty výrobce			
Světelný tok Φ	=	25,2	lm
Fotosyntetický tok fotonů PPF	=	2,64	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Rozdíl vypočtených a katalogových hodnot			
Rozdíl ve výpočtu Světelného toku	=	14,68	%
Rozdíl ve výpočtu PPF	=	114,02	%

Rozdíl mezi vypočtenými a katalogovými hodnotami může být způsoben nepřesností přiložených referenčních hodnot, které výrobce uvádí ve svých katalogových listech a webových stránkách. Nicméně rozdíl může být také způsoben druhem použité křivky relativní spektrální citlivosti rostlin. V této práci se využívá křivka spektrální citlivosti PAR, je však možné, že výrobce vztahuje katalogové hodnoty ke křivce McCree, která má své maxima a minima spektrální citlivosti v jiných oblastech vlnové délky. Této možné diferenci v metodě výpočtu dávám za vinu rozdíl ve výpočtu PPF v případě světelné diody s označením DEEP BLUE. Světelné dioda DEEP BLUE má větší příspěvek vyzářeného spektra v křivce PAR než v křivce McCree viz. Obr. 25. Proto je výsledný fotosyntetický tok fotonů v mém výpočtu vyšší než v případě katalogových hodnot.



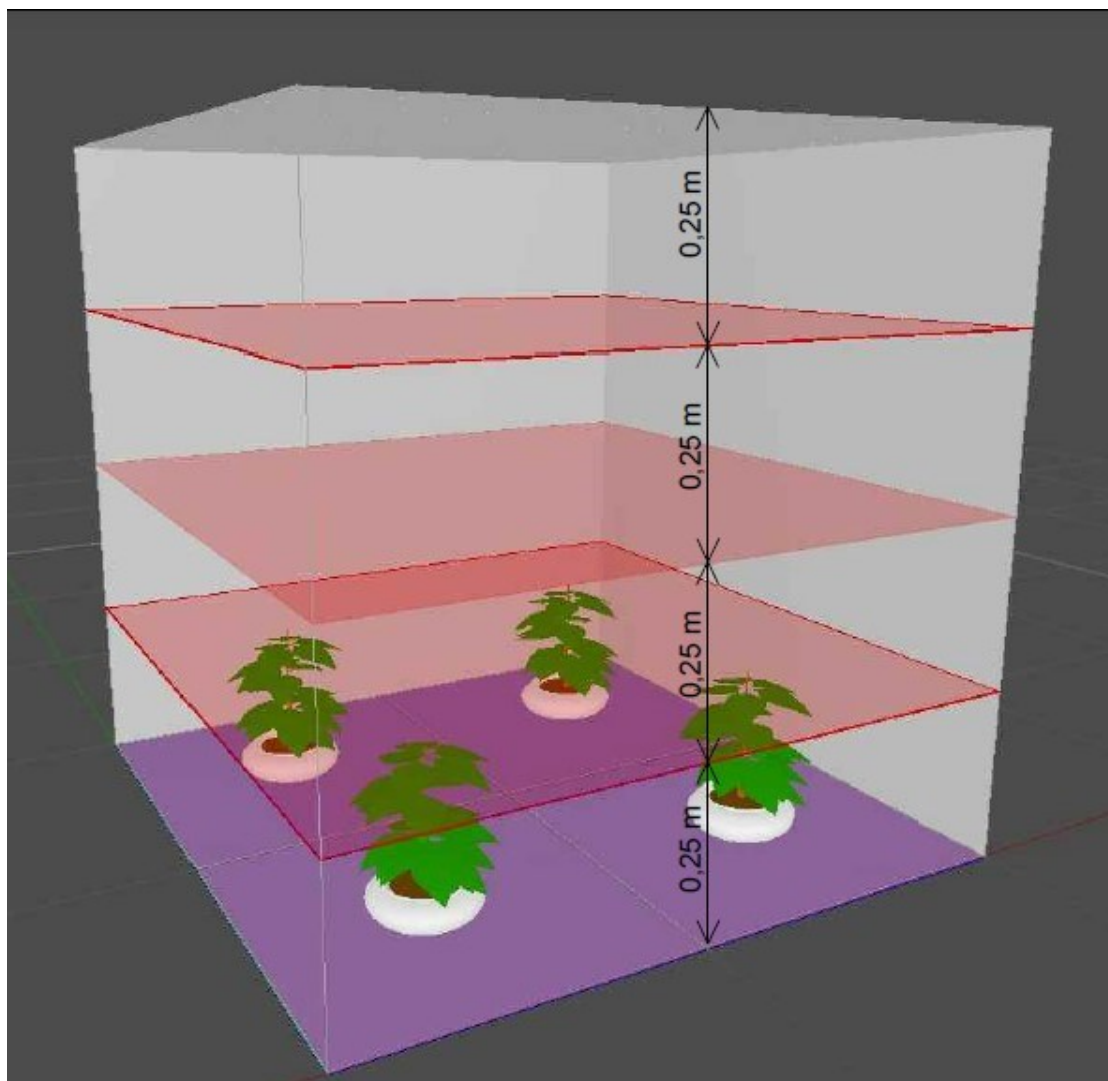
Obr. 25 Rozdíl v maximech a minimech spektrálních křivek citlivosti v závislosti na vyzářovaném spektru počítané LED

8 NÁVRH VÝPOČTU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY PRO PĚSTEBNÍ ÚČELY

Návrh osvětlovací soustavy pro pěstební účely má za cíl demonstrovat chování námi vybraných světelných diod k potřebám rostlin. Návrh byl zrealizován v programu Relux. Součástí návrhu je přepočet světelného toku na PPF a osvětlenosti na PPFD pomocí převodní konstanty viz Tab. 9.

Pro návrh osvětlovací soustavy byl zvolen prostor o rozměrech 1 x 1 metrů. Plochu jeden metr čtvereční osvětlovalo 200 svítidel, každé ze svítidel bylo reprezentováno samostatnou světelnou diodou stejného typu. Celkový příkon, měrný světelný výkon, světelný tok, PPF a PPFD jsou tvořeny součtem jednotlivých parametrů pro danou LED. Optická účinnost svítidla byla 100 %, protože nebyl přidán žádný další optický systém. Nastavení výpočtu bylo pro přímou osvětlenost (zanedbány veškeré odrazné plochy) a udržovací činitel byl na hodnotě 1. Rozměr diody tedy svítidla je 3 x 3 x 1 mm (D x Š x V). LED diody jsou umístěny v poli o rozměrech 1 x 1 m. V deseti řadách o počtu dvaceti kusů LED. Mezera mezi jednotlivými řadami je 100 mm, mezera mezi LED v řadě je 30 mm.

Svítidla byla umístěna ve výšce 1 metr nad zemí. Měřící plochy jsou umístěny ve výšce 0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 metrů nad zemí.



Obr. 26 Návrh osvětlení pěstebního boxu

8.1 Výsledky výpočtu intenzity osvětlení a PPFD

Tab. 11 Vypočtené parametry svítidel (osazených třemi typy LED)

GW QSLR31.EM OSCONIQ® P 3030 [3000K]				
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	66,56			
Příkon [W]	184			
Celkový světelný tok všech zdrojů [lm]	28360			
Měrný světelný výkon [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	154,13			
PPF [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]	426			
PPE svítidla [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$]	2,32			
Osvětlovaná plocha [m^2]	1			
Vzdálenost měřené plochy od svítidla [m]	1	0,75	0,50	0,25
Průměrná osvětlenost [lx]	6050	8564	12552	19074
Průměrné PPFD [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	90,89	128,67	188,59	286,58
GH QSSPA1.24 OSCONIQ® P 3030 [HYPER RED]				
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	9,99			
Příkon [W]	147			
Celkový světelný tok všech zdrojů [lm]	5764			
Měrný světelný výkon [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	40,67			
PPF [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]	577			
PPE svítidla [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$]	3,22			
Osvětlovaná plocha [m^2]	1			
Vzdálenost měřené plochy od svítidla [m]	1	0,75	0,50	0,25
Průměrná osvětlenost [lx]	1090	1570	2360	3660
Průměrné PPFD [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	109,11	157,16	236,24	366
GD QSSPA1.14 OSCONIQ® P 3030 [DEEP BLUE]				
Převodní konstanta (kolik lm je 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$)	3,80			
Příkon [W]	199			
Celkový světelný tok všech zdrojů [lm]	4300			
Měrný světelný výkon [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	21,6			
PPF [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$]	1130			
PPE svítidla [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$]	5,68			
Osvětlovaná plocha [m^2]	1			
Vzdálenost měřené plochy od svítidla [m]	1	0,75	0,50	0,25
Průměrná osvětlenost [lx]	846	1202	1777	2739
Průměrné PPFD [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	222,51	316,15	467,39	720

8.2 Příklady výpočtu s použitím převodní konstanty

Příklad výpočtu PPF a PPFD pro svítidla s osazením LED typu Hyper Red:

Pro výpočet hodnoty PPF je potřeba znát celkový světelný tok a převodní konstantu. Převodní konstanta pro světelnou diodu Hyper Red je 9,998. Celkový světelný tok v programu Relux vyšel 5764 lm z příkonu svítidla 147 W. Proto celkový fotosyntetický tok fotonů bude:

$$\frac{5764 \text{ lm}}{9,99} = 576,98 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro výpočet průměrné hodnoty PPFD je nutno znát průměrnou osvětlenost pro danou srovnávací rovinu (v tomto případě volím srovnávací rovinu ve vzdálenosti jednoho metru od svítidla), dále přepočítávací konstantu a plochu srovnávací roviny (1 x 1 metr = 1 metr čtvereční). V tomto konkrétním případě bude PPFD:

$$\frac{\frac{1090 \text{ lx}}{9,99}}{1 \text{ m}^2} = 109,11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pomocí tabulky výsledků přímě osvětlenosti v prostoru z programu Relux a převodní konstanty jsem vytvořil grafy PPFD pro jednotlivá svítidla.

Grafy PPFD naleznete v příloze: Příloha A (WHITE 3000K), Příloha B (HYPER RED), Příloha C (DEEP BLUE).

9 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo změřit a následně vyhodnotit parametry vybraných LED pro pěstování rostlin. Rovněž cílem bylo naměřené parametry implementovat do výpočetního programu a vytvořit návrh osvětlovací soustavy pro pěstební účely. Teoretická část práce je zaměřena na problematiku osvětlování rostlin umělým osvětlením, definicí zářivých, světelně-technických a fotosyntetických veličin a způsobem měření těchto veličin. Pozornost byla také věnována rozdílům ve vnímání světla mezi rostlinou a člověkem.

Původně praktická část bakalářské práce měla být věnována měření a vyhodnocování světelných zdrojů LED, nicméně díky nouzovému stavu, který panoval na celém území České republiky nebylo možné toto měření v laboratoři provést. Z tohoto důvodu se praktická část práce zaměřila na vytvoření metody výpočtu světelného toku a fotosyntetického toku fotonů světelných zdrojů – v tomto případě světelných diod. Pro výpočet a následné srovnání vypočtených hodnot s hodnotami z katalogových listů byly zvoleny světelné diody výrobce OSRAM řady OSCONIQ, které spadají do kategorie světelných diod určených pro osvětlování rostlin. LED byly vybrány na základě spektrální citlivosti rostlin, která je největší v oblasti modrého a červeného spektra, modrá spektrální oblast příznivě ovlivňuje rychlost a kvalitu růstu, naopak červená oblast kladně působí na kvalitu kvetení. Proto byly vybrány světelné diody DEEP BLUE a HYPER RED. Nicméně rostliny do jisté míry vnímají a využívají světlo i z okolních spektrálních oblastí. Proto jako poslední LED byla vybrána bílá LED s teplotou chromatičnosti 3000K, které pokrývá mnohem širší oblast viditelného spektra, než světelné diody DEEP BLUE a HYPER RED.

Výpočet fotosyntetického toku fotonů probíhal v programu Excel za základě hodnoty citlivosti rostlin ($0,008359 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), relativního spektra vyzařování LED, zářivého toku LED a relativní spektrální citlivosti rostlin, která je popsána pomocí takzvaných křivek spektrální citlivosti, například křivka McCree nebo PAR. V tomto bodě je nutné zmínit, že výrobci světelných zdrojů pro osvětlování rostlin plošně nevyužívají jednu z těchto křivek. Z tohoto vyplývá, že jeden konkrétní světelný zdroj může mít rozdílné hodnoty fotosyntetického toku fotonů při stejných provozních podmínkách (teplota, napájecí napětí a proud), právě na základě použití daného typu křivky relativní spektrální citlivosti rostlin. Pro výpočet v této práci byla použita křivka PAR.

Výsledky výpočtu fotosyntetického toku fotonů ve srovnání s katalogovými listy se liší v řádu desítek procent, rozdíl připisují možné nedokonalosti přepočtu relativního spektra vyzařování na použitý rozsah vlnové délky užitý ve výpočtu (400; 405; 410; ...; 700 nm). Výrobce předkládá data v rozsahu (400; 402; 404; ...; 700 nm). Avšak rozdíl hodnot může být také způsoben možnou chybou v katalogovém listu LED. Nicméně rozdíl v případě LED DEEP BLUE je **114 %**, tak značný rozdíl ve výpočtu a katalogovou hodnotou připisují možné skutečnosti, kdy výrobce využívá pro stanovení fotosyntetických parametrů svých světelných diod křivku McCree namísto PAR. Křivka McCree v oblasti modrého spektra dosahuje nižší relativní spektrální citlivosti rostlin než křivka PAR. Světelná dioda DEEP BLUE je tedy účinnější v oblasti křivky PAR než McCree. Pro ověření správnosti výpočtu bych provedl měření fotosyntetického toku fotonů pomocí kvantového senzoru vybaveným filtry pro křivku PAR i McCree. Nejúčinnější z vybraných LED v oblasti křivky PAR je LED DEEP BLUE, u které z jednoho wattu příkonu získáme **5,65 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$** , druhá v pořadí LED HYPER RED a třetí bílá LED 3000K.

Výpočet světelné toku probíhal také v programu Excel na základě měrné světelné účinnosti lidského oka (**683 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$**), relativního spektra vyzařování LED, zářivého toku LED a relativní spektrální citlivosti

lidského oka, která je popsána pomocí křivky fotopického vidění $V(\lambda)$. V tomto případě je křivka fotopického vidění standardizována pro normálního fotometrického pozorovatele.

Výsledky vypočteného světelného toku ve srovnání s katalogovými hodnotami se liší v řádu jednotek procent, nicméně v případě světelných diod DEEP blue je to 14,68 %. Rozdíl vyšší než 10 % připisují možné nedokonalosti přepočtu relativního spektra vyzařování na použitý rozsah vlnové délky užitý ve výpočtu (380; 385; 390; ...; 780 nm). Výrobce předkládá data v rozsahu (380; 382; 384; ...; 780 nm). Avšak rozdíl hodnot může být také způsoben možnou chybou v katalogovém listu LED. Pro zjištění původu rozdílu ve výpočtu bych provedl měření světelného toku v laboratoři pomocí kulového integrátoru. Nejúčinnější z vybraných LED v oblasti křivky fotopického vidění je bílá LED 3000K, u které z jednoho wattu příkonu získáme 153 lumenů, druhá v pořadí LED HYPER RED a třetí DEEP BLUE.

Návrh osvětlovací soustavy pro pěstování rostlin obsahoval tři teoretická svítidla. Každé ze svítidel bylo osazeno jedním z typu LED (200 kusů LED/svítidlo) a osvětlovaly samostatně plochu o rozměrech 1 x 1 m. Parametry LED byly upraveny na základě výpočtu světelného toku. Výpočet intenzity osvětlení byl proveden v programu Relux. Nastavení parametrů výpočtu: výpočet přímé osvětlenosti (zanedbány veškeré odrazné plochy), udržovací činitel 1, měřicí roviny jsou ve vzdálenosti od svítidla 0,25; 0,5; 0,75 a 1 m, světelná účinnost svítidel je 100 %.

Výsledné hodnoty osvětlenosti byly následně přepočítány na PPFD pomocí převodní konstanty. Nejúčinnější svítidlo pro pěstování rostlin v oblasti křivky PAR z daného příkonu je svítidlo s LED DEEP BLUE, druhé v pořadí svítidlo s LED HYPER RED a třetí svítidlo s bílými LED 3000K. Nicméně jediné svítidlo, které by mohlo být použito pro pěstování rostliny v celé době jejího životního cyklu je svítidlo osazené bílými LED 3000K. Vyzařované spektrum této diody obsahuje modré i červené spektrum. Modré spektrum stimuluje pouze růst rostliny a červené naopak kvetení.

Kombinací vyzařovaných spekter těchto tří světelných diod je možné vytvořit svítidlo, které bude mít největší příspěvek vyzařovaného spektra v křivce PAR a zároveň jej budeme moci použít pro všechny vegetační fáze rostliny.

POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] Světlo: Co to je a jak funguje?. *Lighting Phillips* [online]. Česká Republika: Phillips, [21. století] [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.lighting.philips.cz/consumer/advice-on-lighting-ideas/jak-funguje-svetlo>
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Vydání první. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [3] Isaac Newton: Optika, aneb historie pátrání po podstatě světla. *Science World* [online]. Česká Republika: Science World, 2004 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/isaac-newton-optika-aneb-historie-patrani-po-podstate-svetla-2204/>
- [4] Vliv světla na pohodu člověka. *Kanlux* [online]. Česká Republika: Kanlux s.r.o., [21. století] [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.kanlux.com/cz/clanky/Vliv-svetla-na-pohodu-cloveka>
- [5] HLADKÝ, Luděk. Osvětlení z pohledu rostlin. *Světlo* [online]. FCC PUBLIC, s. r. o., 2010, **2010**(4), 42-44 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41827.pdf>
- [6] HAŠ, Stanislav a Petra PAVLÍČKOVÁ. Osvětlování okrasných rostlin v interiérech. *Světlo* [online]. FCC PUBLIC, s. r. o., 2010, **2010**(4), 45-49 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41828.pdf>
- [7] Understanding growth light terms. In: *Mmj daily* [online]. Švédsko: Heliospectra, 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmjdaily.com/article/9234178/understanding-growth-light-terms/>
- [8] YEH, Naichia a Jen-Ping CHUNG. High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2009, **13**(8), 2175-2180 [cit. 2021-04-25]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.01.027
- [9] SIPOS, László, Ildikó BOROS, László CSAMBALIK, Géza SZÉKELY, András JUNG a László BALÁZS. Horticultural lighting system optimization: A review. *Scientia Horticulturae* [online]. 2020, **273** [cit. 2021-04-25]. ISSN 03044238. Dostupné z: doi:10.1016/j.scienta.2020.109631
- [10] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Vydání první. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [11] ČERNÁ, Ladislava. *Fotometrie, radiometrie a spektroskopie: Měření neelektrických veličin* [online]. , 3-16 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>
- [12] About PAR, PPF, And PPFD. In: *Fluence by Osram* [online]. Texas [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://fluence.science/science-articles/horticulture-lighting-metrics/#tab-par-696>
- [13] Information on Several Important Parameters of LED Grow Light-PAR/PPF/PPFD/DLI. In: *Atop Lighting* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.atophort.com/news/information-on-several-important-parameters-of-led-grow-light.html>

- [14] Light in numbers. *Cre.science* [online]. Německo: Cree Science, [21. století] [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://cre.science/en/wissen/grow-light-metrics/>
- [15] Knowledge: PAR, PPF, YPF, PPFD and DLI. In: *MTx MechaTronix* [online]. Nizozemsko [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.horti-growlight.com/en-gb/par-ppf-ypf-ppfd-dli>
- [16] Luxmetr UNI-T UT383. In: *HotAir* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/merici-pristroje/mereni-neelektrickych-velicin/luxmetr-uni-t-ut383.html?gmc>
- [17] Minolta LS-110 jasoměr. In: *Elex Brno* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.elexbrno.cz/detail.php?prold=1137&secl=219>
- [18] Goniofotometr. In: *VYRTYCH: Centrum vývojových a zkušebních laboratoří* [online]. Česká Republika: VYRTYCH a.s, [21. století] [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.cvzl.cz/Vybaven%C3%AD-laborato%C5%99e/Goniofotometr>
- [19] Kulový integrátor. In: *VYRTYCH: Centrum vývojových a zkušebních laboratoří* [online]. Česká Republika: VYRTYCH a.s, [21. století] [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.cvzl.cz/Vybaven%C3%AD-laborato%C5%99e/Kulov%C3%BD-integr%C3%A1tor>
- [20] *Light and Lighting Control in Greenhouses* [online]. 1st. Kanada: Argus Control Systems Ltd, 2017 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.arguscontrols.com/resources/Light-and-Lighting-Control-in-Greenhouses.pdf>
- [21] Must-Have Meters: For measuring light *GROWERTALKS* [online]. 2019 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.growertalks.com/Article/?articleid=23990>
- [22] SRI 2000 Handheld Illuminance Spectrometer. In: *Dvk instruments* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://dvkinstruments.com/product/sri-2000-handheld-illuminance-spectrometer/>
- [23] CHEN, Yinning. **【Exclusive Interview】** Osram Opto Semiconductors' Leading Hyper Red LED Technology to Support Rising Global Horticulture Lighting Market. *LED inside* [online]. Taiwan: LED inside, 2020, s. 1 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.ledinside.com/interview/2020/10/osram_horticulture_led_hyperred
- [24] PPF & PPFD Guide to compare GROW-LEDs. *SanLight* [online]. Rakousko: SanLight, [21. století] [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.sanlight.com/en/about-ppf-and-ppfd/>
- [25] LED Grow Light Terms: Efficacy (umol/J or PPF/W). *420 LED Guide* [online]. 420 LED Guide, 2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.420ledguide.com/led-grow-light-terms-efficacy-umol-j-or-ppf-w/>
- [26] LED Grow Lamps & Light Terms: PPFD (PAR) & Light Footprint Maps. *Ledtonic* [online]. USA: ledtonic, 2020 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.ledtonic.com/blogs/guides/ppfd>
- [27] LED Horticultural Lighting. *Manicbotanix* [online]. Manicbotanix, 2015 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://manicbotanix.com/led-horticultural-lighting/>
- [28] Best Horticulture LEDs. *Lightning Manufacturer* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/198/>

- [29] Doplnky LED profilů. *TRON* [online]. Česká Republika: TRON [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.tron.cz/ke-stazeni/znalostni-centrum/doplňky-led-profilu>
- [30] MIGRO ARAY 3 | 270W. *MIGRO* [online]. Irsko: MIGRO [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.migrolight.com/product/migro-array-3/>
- [31] Zdroje konstantního výkonu pro LED. *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. Česká Republika: FCC PUBLIC, s. r. o., 2019 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/zdroje-konstantniho-vykonu-pro-led--3930>
- [32] Lineární pěstební svítidlo závěsné 85W. In: *LEDmeGROW.cz* [online]. Česká Republika: LEDmeGROW, [21. století] [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.ledmegrow.cz/linearni-pestebni-svitidlo-bar-85w/>
- [33] LUMATEK ZEUS 465W COMPACT PRO. In: *Lumatek professional lighting* [online]. Velká Británie: Lumatek, [21. století] [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://lumatek-lighting.com/lumatek-zeus-465w-pro/>
- [34] What Is A Quantum Board LED Grow Light?. *Grow Light Info* [online]. Grow Light Info, 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://growlightinfo.com/what-is-a-quantum-board/>
- [35] Best Quantum Board LED Grow Lights – How To Choose a Perfect One?. In: *Gardeners Yards* [online]. [21. století] [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://gardenersyards.com/best-quantum-board-led-grow-lights-how-to-choose-a-perfect-one/>
- [36] Are COB LED Grow Lights Better For Plants?. *Grow Light Info* [online]. Grow Light Info, 2020 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://growlightinfo.com/are-cob-led-grow-lights-better/>
- [37] OPTIC 1 COB LED GROW LIGHT 54W 3500k. In: *Best Grow* [online]. Česká Republika: Best Grow, [21. století] [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.bestgrow.cz/pioneer-led-grow/pioneer-p1/?variantId=11045>
- [38] ROBERTS, Michael. What light do plants need?. *EconoLux* [online]. EconoLux Industries Ltd., 2016, , 1-14 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://www.induluxtech.com/What%20Light%20Do%20Plants%20Need-Net.pdf>
- [39] *OSRAM Opto Semiconductors* [online katalogový list]. GW QSLR31.EM [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.osram.com/ecat/OSCONIQ%C2%AE%20S%203030%20GW%20QSLR31.EM/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_5172868/
- [40] *OSRAM Opto Semiconductors* [online katalogový list]. GH QSSPA1.24 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.osram.com/ecat/OSCONIQ%C2%AE%20P%203030%20GH%20QSSPA1.24/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_7160276/
- [41] *OSRAM Opto Semiconductors* [online katalogový list]. GD QSSPA1.14 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.osram.com/ecat/OSCONIQ%C2%AE%20P%203030%20GD%20QSSPA1.14/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_8095339/

SEZNAM PŘÍLOH

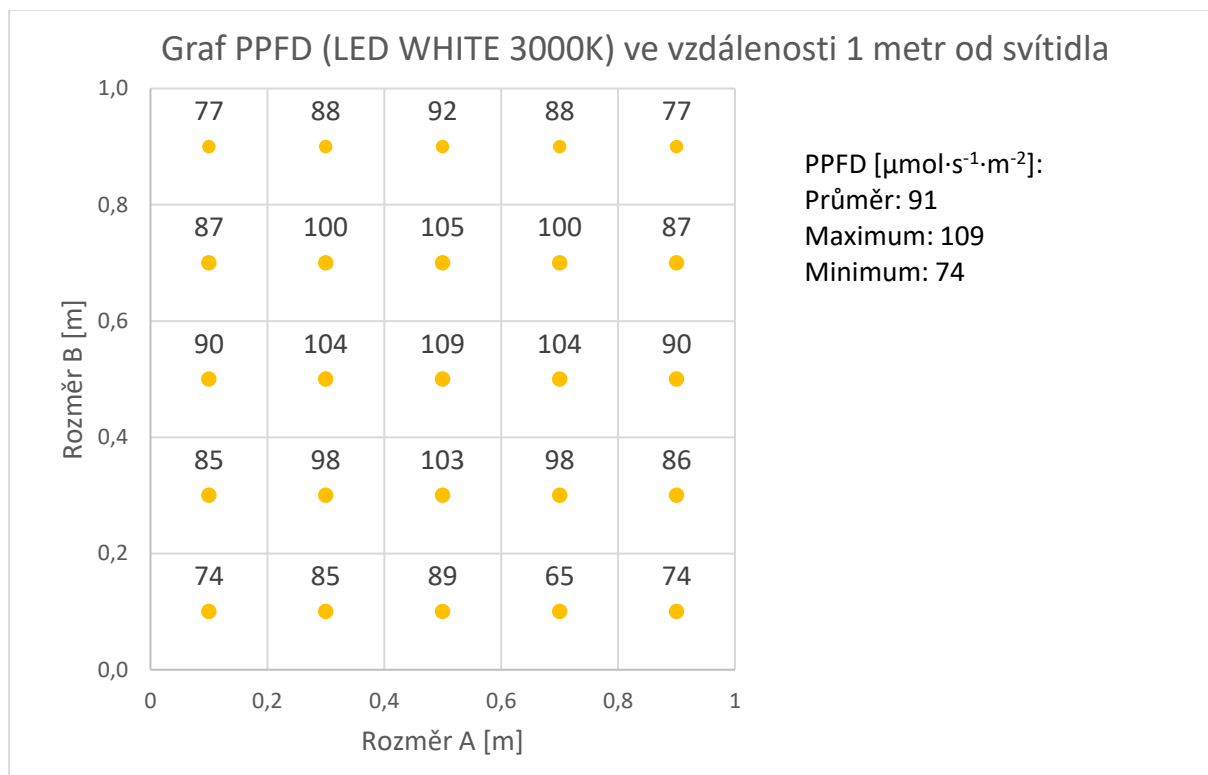
- Příloha A: Graf PPFD (LED WHITE 3000K)
- Příloha B: Graf PPFD (LED HYPER RED)
- Příloha C: Graf PPFD (LED DEEP BLUE)

Přílohy v informačním systému Edison:

Výpočet intenzity osvětlení v programu Relux:

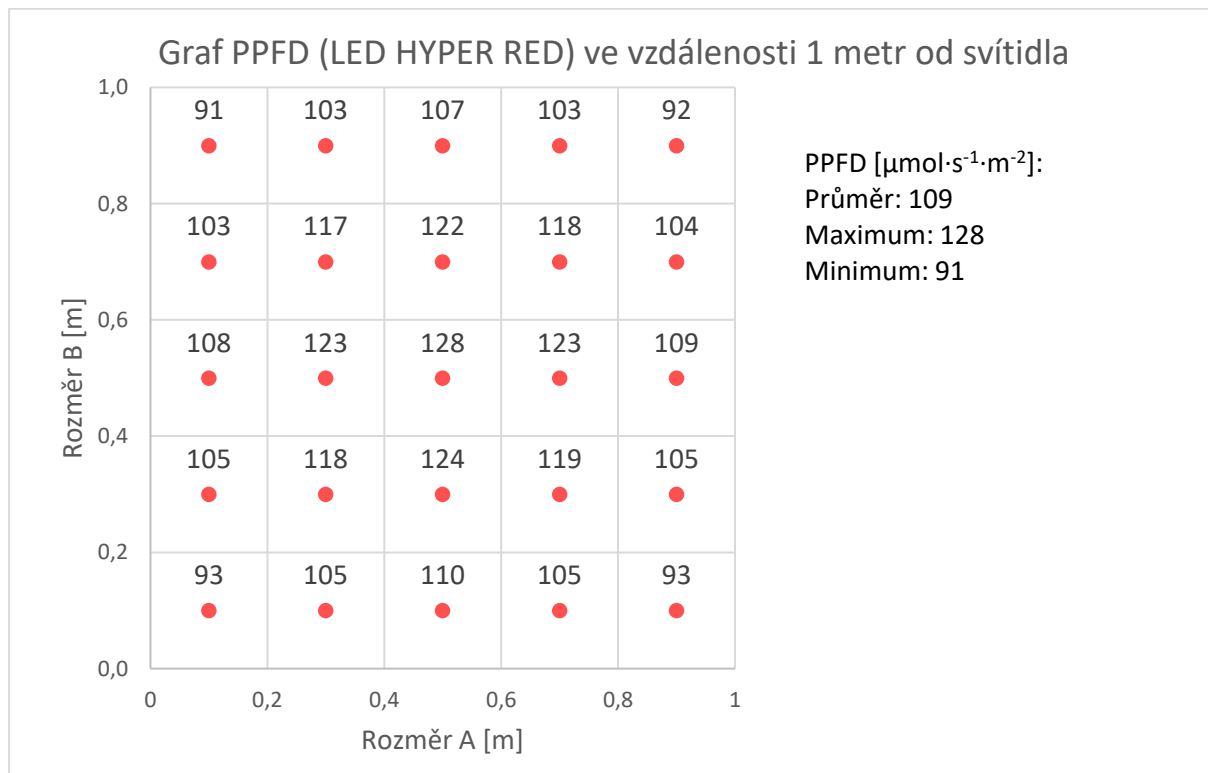
- Příloha 1 Výpočet intenzity osvětlení (DEEP BLUE)
- Příloha 2 Výpočet intenzity osvětlení (HYPER RED)
- Příloha 3 Výpočet intenzity osvětlení (WHITE 3000K)

Příloha A



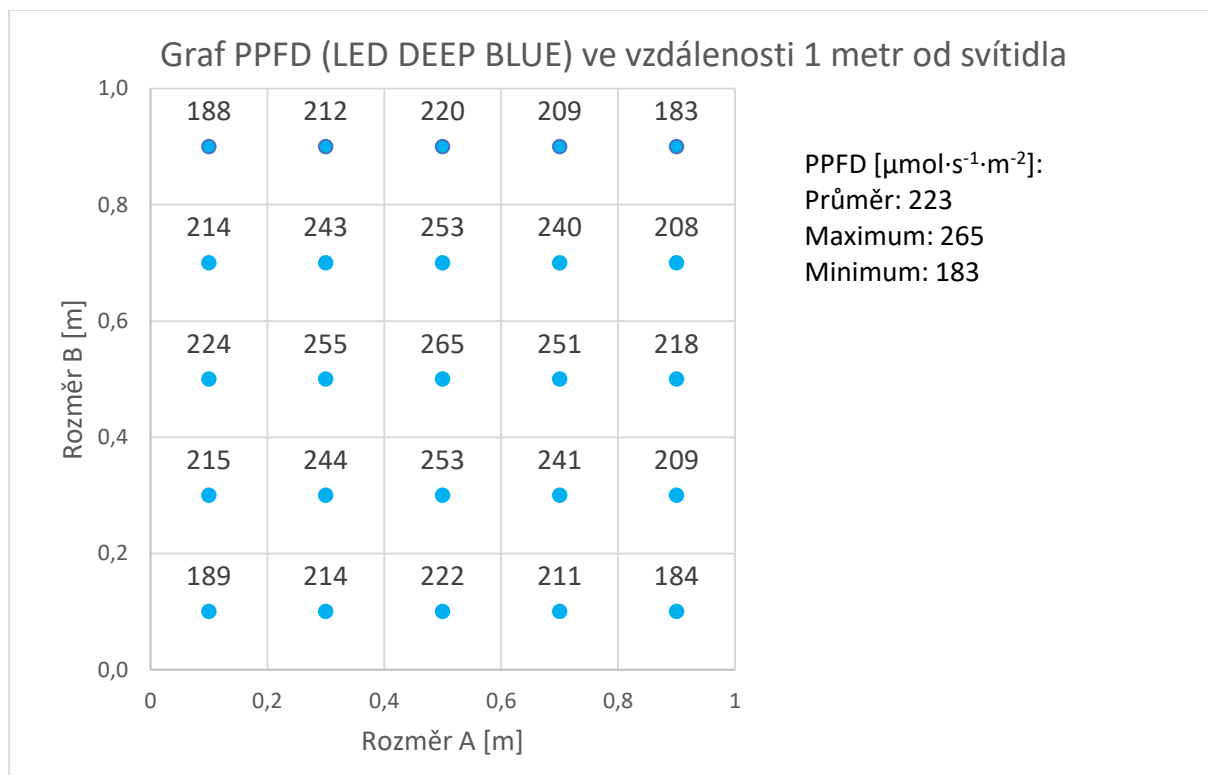
Příloha A: Rozložení PPFD v prostoru pěstebního boxu, svítidlo osazeno bílou LED 3000K

Příloha B



Příloha B: Rozložení PPFD v prostoru pěstebního boxu, svítidlo osazeno LED HYPER LED

Příloha C



Příloha C: Rozložení PPFD v prostoru pěstebního boxu, svítidlo osazeno LED DEEP BLUE